

放電・超高速ミーリング 複合加工の研究

特殊加工研究室

指導教員 小林和彦

知能機械システム工学科

1040165

山本浩司

目次

1.緒言	3
1.1 新しい切削加工技術	4
1.2 高速ミーリング加工	4
1.3 複合加工とは	5
1.3.1 複合加工を行う上での長所	6
2.実験装置及び実験方法	7
2.1 実験装置	7
2.2 実験装置接続図	14
2.3 センサ概要	15
3.切込み量とボールエンドミルの磨耗について	16
3.1 実験概要	16
3.2 実験方法	16
3.3 ボールエンドミルの磨耗についての実験	18
3.4 放電荒加工面 15 $\mu\text{m}/R_y$ に切込み量(Z)におけるグラフの評価方法	19
3.5 実験結果	20
3.5.1 放電荒加工面 15 $\mu\text{m}/R_y$ に切込み量 15 μm 加工の実験結果	20
(1)顕微鏡写真による刃の磨耗実験結果	20
(2)顕微鏡写真によるワークの実験結果	22
(3)ミーリング加工後における表面粗さの実験結果	24
(4)センサによる Force/Torque の測定結果	25
3.5.2 放電荒加工面 15 $\mu\text{m}/R_y$ に切込み量 25 μm 加工後の実験結果	31
(1) 顕微鏡写真による刃の磨耗結果	31
(2)顕微鏡写真によるワークの実験結果	33
(3)ミーリング加工後における表面粗さの実験結果	35
(4)センサによる Force/Torque の測定結果	36
3.5.3 放電荒加工面 15 $\mu\text{m}/R_y$ に切込み量 35 μm 加工の実験結果	42
(1)顕微鏡写真による刃の磨耗実験結果	42
(2)顕微鏡写真によるワークの実験結果	44
(3)ミーリング加工後における表面粗さの実験結果	46

(4)センサによる Force/Torque の測定結果	47
3.5.4 放電荒加工面 15 $\mu\text{m}/\text{Ry}$ に切込み量 35 μm 加工実験結果	53
(1)顕微鏡写真による刃の磨耗結果	53
(2)顕微鏡写真によるワークの実験結果	54
(3)センサによる Force/Torque の測定結果	55
(4)従来の加工法と複合加工との時間比較	57
(5)加工段階ごとのワークの硬度測定結果	59
3.6 まとめ	60
4.焼入れ鋼に直接高速ミーリング加工を行う実験について	61
4.1 実験概要	61
4.2 実験方法	61
4.3 実験結果	62
(1)顕微鏡写真による刃の磨耗結果	62
(2)顕微鏡写真によるワークの実験結果	64
(3)ミーリング加工後における表面粗さの実験結果	66
(4)センサによる Force/Torque の測定結果	67
4.4 まとめ	73
5.結論	74
謝辞	75
参考文献	76

第一章

形彫放電加工における高速ミーリング複合加工に関する研究

1 緒言

形彫放電加工機を用いて、荒加工から仕上げ加工 $1\mu\text{m}$ までの金型を仕上げる場合、下のグラフを見ても分かるように放電荒加工は短時間に加工できるが仕上げ加工 $1\mu\text{m}$ まで加工を行う場合非常に時間を費やしていることが分かる。そのため金型加工法において、放電加工後の磨き作業は古くからきわめて大きな課題であり、現在においても人手による磨きに頼っているのが現状である。また、磨き作業は、作業者の経験や技能に依存することが多く、それぞれの職場の歴史や工作物の材質によっても異なる。そうしたなかで、磨き作業を受けもつ熟練工の確保が次第に難しくなってきた現在、広い範囲で利用可能な磨き加工法の研究開発が必要であると考えられる。

現在、金型製作法において行われている研究の一つとして、高速ミーリングを用いた切削加工があり、本研究では放電荒加工後に高速ミーリングを行なうことにより、形彫放電加工機上において複合加工を行いその可能性について検討する(以下この加工法を複合加工と略称)。

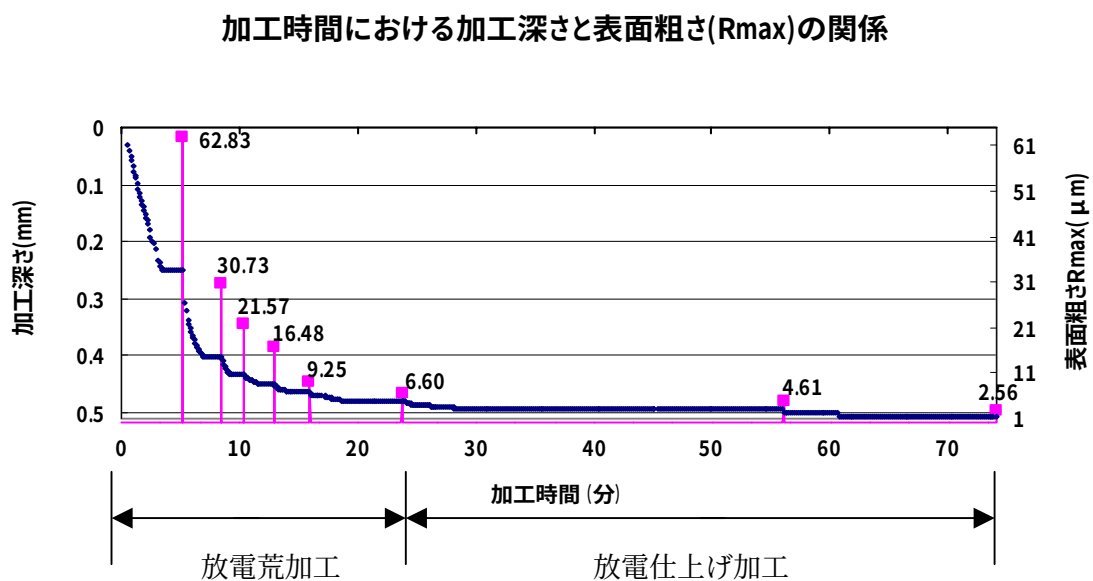


図 1.1 加工時間と加工深さ表面粗さの関係

1.1 新しい切削加工技術

切削加工は主として機械的エネルギーを利用し、被削材中で切刃により破断現象を起こさせ、被削材の一部を切りくずとして除去する加工法である。この加工法を用いることにより表面を持った製品を能率よく低いコストで作ることが出来る。

切削加工の分野で、これまでの常識を覆す画期的な加工法が生まれた。小径工具を高速回転させて送りを早くする高速ミーリング加工法である。工具材料として超硬ボールエンドミルなどを用いて加工を行なう。

1.2 高速ミーリング加工

ボールエンドミル加工で精度良く加工しようとすれば、小径ボールエンドミルを用いて、ピックフィードと切込み量を小さくすれば良いのだがそうすると当然長時間を要し、コストもアップする。加工時間を短縮するには、送り速度を早くすればよいのだが、そうすると1刃当りの送りが大きくなり、工具への負担が増大する。これを解決するには工具の回転数を増大すれば良い。また削り残しを少なくして精度良く、しかも長時間を要さずまたコストダウンをさせるためには、小径ボールエンドミルを高速回転させ加工を行なうことにより実現できる。

また、高速ミーリングの大きな特徴の一つに、切削後被削材、工具ともに温度上昇が認められないという特徴がある。

ここで言う高速ミーリングは、浅切り込み、高送りを前提として出来るだけ工具にかかる負担を抑えた切削加工をいう。高速に回転した小径ボールエンドミルを用いて、少ない種類の工具で形状を加工することによりCAMの軽減にもつながり、高速に回転させて、速く送れば加工時間の短縮になり生産性がアップする。そのため金型の表面などの形状加工を一般にボールエンドミルを使用する。

通常、焼入れ鋼材を用いた金型加工では、放電加工が一般であるが電極の加工、加工精度、コストなどを考えた場合、HRC50程度なら超硬ボールエンドミルでも十分加工可能である。しかしそれ以上の高硬度金型材質の加工の場合放電加工機に頼らざるおえないとゆわれている。そこで、高硬度材質を複合加工を行うことにより高速ミーリング加工での仕上げ加工が加工可能であるかについて今回実験を進めていく。

1.3 複合加工とは

最近、新しい加工技術として複合加工ということが盛んにいわれるようになってきた。複合加工とは、機械加工技術に対して従来の加工技術の二つ以上を空間的、時間的に集約して、各種の固有加工技術の短所を補い、長所を合理的に組み合わせることによって、所定の素材を作る技術を複合加工という。

今回の実験では、形彫放電加工機と高速ミーリング加工を同一機械上で加工することを示す。

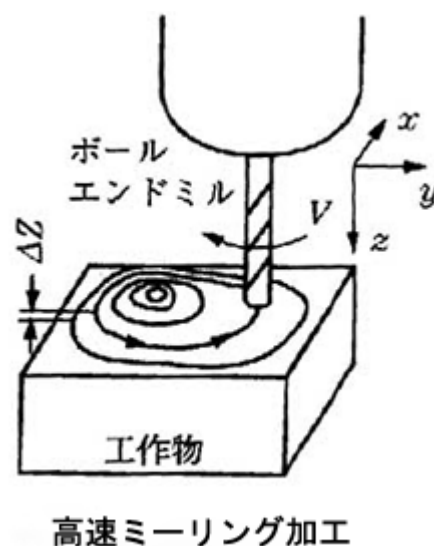
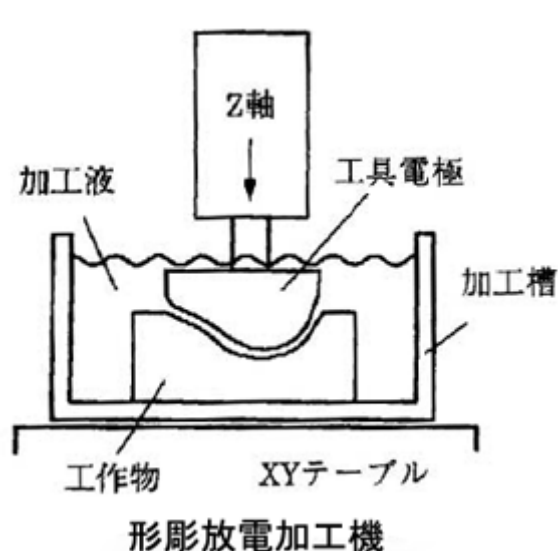


図 1.2 形彫放電加工機

図 1.3 高速ミーリング加工

図 1.1 のグラフより、形彫放電加工機で荒加工から仕上げ加工 $1\mu\text{m}$ の場合、荒加工は非常に短時間に加工できるが、中加工から仕上げ加工 $1\mu\text{m}$ まで加工を行う場合、非常に時間がかかる。そこで今回、形彫放電加工機で荒加工 $15[\mu\text{m/Ry}]$ まで加工を行い中加工から仕上げ加工 $1\mu\text{m}$ までを高速ミーリング加工するために、形彫放電加工機上に (図 1.2) 高速スピンドル (図 1.3) を装着することによる加工法を今回複合加工と呼ぶ。

1.3.1 複合加工を行う上での長所

複合加工を行うことによって以下に挙げる長所があるものと考えられる。

- 1.仕上げ工程を切削加工で行なうことによって仕上げ加工と同時に金型において致命的とされる表面変質層も除去できるものであり、磨き作業の低減に繋がる。
- 2.現在放電加工において加工時間の大部分は仕上げ工程に費やされている。これを複合加工法を用いることによって加工時間の短縮を図れると共に、仕上工程の NC 化が出来る。
- 3.高硬度材や難切削材を加工するにあたっては、ミーリングのみで加工をするよりも、荒加工段階を放電加工で加工することによって加工の効率化を図ることが出来る。
- 4.荒加工から仕上げ加工までを同一機械上で行うために、ワークのチャッキングに伴う位置決め寸法誤差や、その他の付随する誤差発生原因を除去できるものである。また、同一機上で加工するためにワークを加工液に完全に沈めて加工できることから、加工液を軸付近から噴出する従来のミーリング加工法よりも冷却効果を始め、排出効果などの効率を向上することが出来る。
- 5.従来、放電加工機のみで金型を精密に仕上げる場合には荒加工用電極や仕上げ用電極など数本の電極を用いる必要があった。これを複合加工を用いることによって仕上げ用電極を不要とできることから、それに費やす時間やコストを削減出来る。以上の点より、複合加工を用いることによって様々な利点を見出すことが出来る。

前回の実験で、ワーク材質 SK-5 に複合加工を行うことができた。そこで今回ワーク材質を変更し SK-5 の焼入れ鋼(HRC-55)に複合加工が可能かどうかについて、今回実験を進めていく。まず、放電荒加工面 $15[\mu\text{m/Ry}]$ に切込み量を $15, 25, 35[\mu\text{m}]$ と変化させながら加工を行い、SK-5 の焼入れ鋼へ複合加工ができるかどうかについての実験を行なう。その後 SK-5 の焼入れ鋼に直接高速ミーリング加工行った場合とどちらが実用的かについて検討する。また切込み量を変化させた場合、エンドミルの磨耗を調べ実用可能かどうかについて考察を行なう。

2 実験装置及び測定方法

2.1 実験装置

(1) 形彫放電加工機 三菱電機社製 VX10

本研究は、放電加工と超高速回転ミーリング加工の複合加工を行うことを目的としている。つまり、放電荒加工を行った後に同機械上にてミーリング機能を持ったものに軸交換して加工を行うわけである。そのためにも加工機にはその二つの機能が必要となる。機械は、図 2.1 に示すような三菱電機社製 VX10 を用いて実験を行った。同機の主要な仕様を表 2.1 に示す。



図 2.1 形彫放電加工機の外観写真

表 2.1 VX10 の主要な仕様

最小指令単位	0.1 μm
最小駆動単位	0.1 μm
駆動方式	AC サーボモータ
位置検出方式	ロータリーエンコーダ

まず放電荒加工についてであるが、使用した加工条件は、形彫放電加工機 VX-10 に内蔵されている FAP(フレキシブル自動プログラム)を使用して加工条件を導きだした。

放電加工機にて荒加工を施した後、機械軸は本実験のために製作した超高速回転ミーリング用の機器に軸交換して加工を行う。

(2)スピンドルコントロールユニット NSK 社製 ASTRO-E400

本論文中の切削加工は全て図 2.2 に示すスピンドルユニットを用いて加工を行った。このスピンドルユニットは歯科医療器具を応用したものであり、0～40,000rpm の回転制御域を有している。また同機は本来マシニングセンタ用に開発されているために、放電加工機に直に取り付けることは出来ない構造になっている。したがって、ユニット上部のチャック用部分であるテーパ部を取り外し、隙間にスペーサを割り込ませることによって放電加工機に取り付けた。



図 2.2 スピンドルコントロールユニット外観写真

(3) 6軸力覚センサ ATI 社製 Delta ST-330-30

放電加工機に超高速回転ミーリング加工機能を付随させることによって加工軸に多大な切削力が負荷される事が考えられる。そこで、図 2.3 に示す ATI 社製の 6 軸力覚センサを加工軸と機械の間に取り付けて、機械に負荷する種々の力を測定した。このセンサは、Force 及び Torque を測定することが出来るセンサである。機能については定格で Force の x,y 方向では $\pm 330\text{N}$ 、z 方向では $\pm 990\text{N}$ 、Torque に関しては書く方向に $\pm 30\text{N}\cdot\text{m}$ まで測定できるものであり、分解能は Force の x,y 方向では $\pm 1/64\text{N}$ 、z 方向では $\pm 1/32\text{N}$ 、Torque に関しては $\pm 3/3200\text{N}\cdot\text{m}$ を有するものである。



図 2.3 6 軸力覚センサ外観写真

(4)ISA-BUS カード ATI 社製

図 2.3 に示した Force 及び Torque は図 2.4 に示す ISA-BUS カードを介してパソコンにデータを転送する。このカードは 6 軸力覚センサにて得られたデータをパソコンにリアルタイムに表示させるためのものである。表 2.2 にその機能を示す。

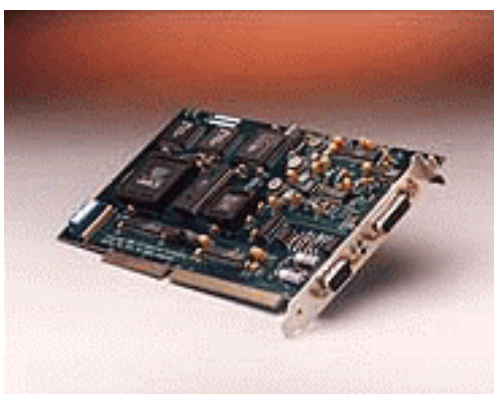


図 2.4 ISA-BUS カード外観写真

表 2.2 ISA-BUS カードの主要な仕様

I/O アドレス	4 ポート占有
バス仕様	AT バス仕様
サンプリング	7.8kHz
分解能	12～16bit

(5) ATI ISA F/T Demo ソフト Ver2.6.0 ATI 社製

6 軸力覚センサと ISA-BUS カードにて得られたデータは、図 2.5 に示すソフトウェアによって単位換算され、N と N-m としてリアルタイムに表示される。このソフトウェアは数値で値を表示すると同時に、仮想空間上に力を表示することが出来る。また、採取したデータを記録する機能も備えており、Excel のマクロを用いて表示する機能も兼ね備えている。データは 10Hz から 7800Hz までの周期で採取することが可能である。

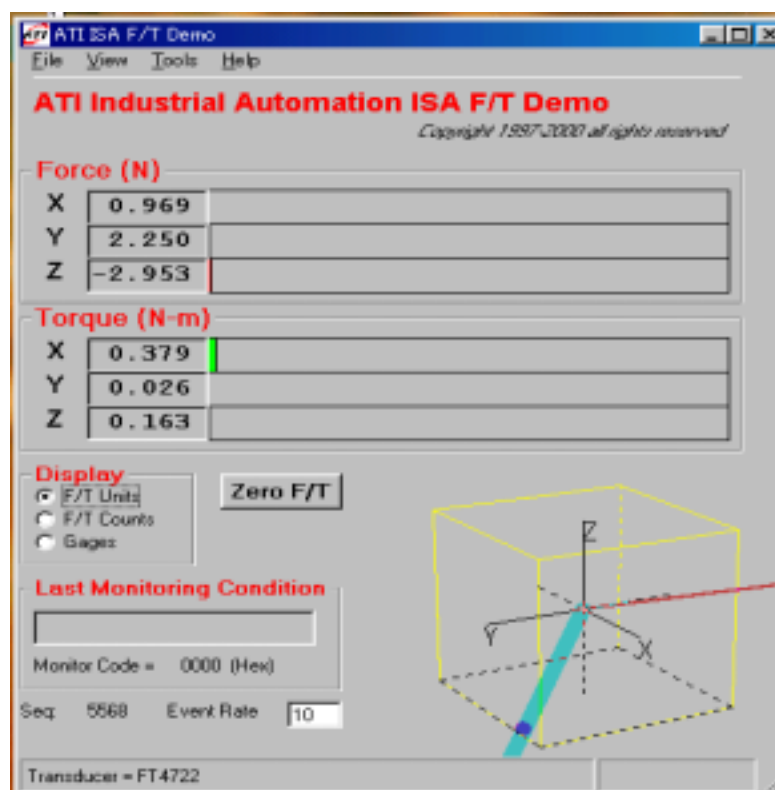


図 2.5 ATI ISA F/T Demo ソフト

(6) 東京精密製 小型表面粗さ測定器 ハンディサーフ E-35A

今回用いた面粗さ測定器は図 2.6 に示す東京精密製のものである。これは、ハンディタイプであるために、計測箇所まで同機を持ち運び測定することが出来る。また、同機は測定データをパソコンに取り込む機能を有しており、Excel のマクロを通じてデータを表示、解析することが出来るようになっている。本実験での測定は図 2.7 に示すように、超高速回転ミーリング加工後のカッター筋に対して垂直方向と平行方向の 2 方向について行い、6 回の測定値の平均値より表面粗さを求めた。ここで、カットオフ値 0.25mm で行い、測定長さはカットオフ値の 5 倍である 1.25mm として測定を行った。同機の主要な機能については表 2.3 に示す。



図 2.6 面荒さ測定器

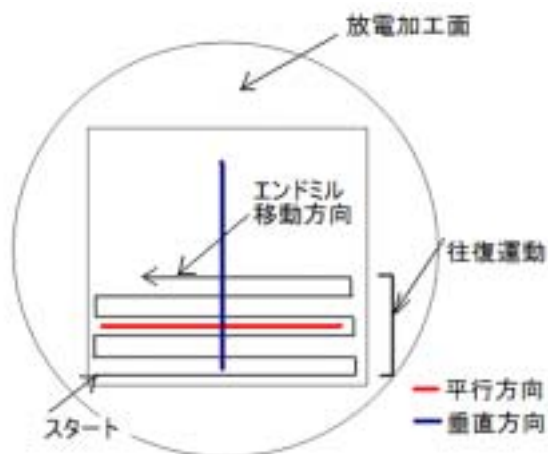


図 2.7 測定方向

表 2.3 表面粗さ測定器の主要な使用

測定範囲	X 軸:12.5mm Z 軸:±160 μ m
変換器	差動インダクタンス方式
触針先端	ダイヤモンド 90°円錐 5 μ mR
測定力	4mN(0.4gf)以下
パラメータ	(JIS)Ra,Rq,Ry,Rz,Rt,Sm,Pc,tp,Rpk

(7)測定顕微鏡 OMRON 3D デジタルファイスコープ 形 VC3000

放電荒加工面また超高速ミーリングを施したワークに対して、図 2.8 に示す測定顕微鏡で観察及び測定を行なった。この顕微鏡は 100～600 倍まで倍率を変化させることができる他に、顕微鏡の中に内装されている CCD カメラ(画素数 221 万画素)により測定物を加工のたび撮影し、顕微鏡の中にあるコンパクトフラッシュに記録することが可能である。本実験では放電荒加工面、超高速ミーリング加工後のワークを 100 倍の倍率を用い、ボールエンドミルの刃先を 600 倍の倍率を用いた。同機の主な仕様は表 2.4 に示す。

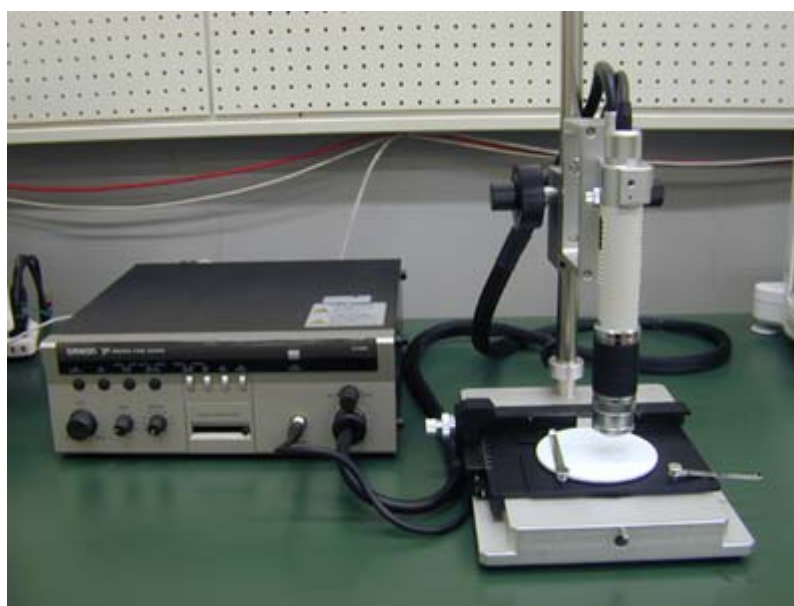


図 2.8 測定顕微鏡の写真

表 2.4 測定顕微鏡の主な仕様

カメラ	撮像素子	1/1.8型CCD
	装画素数	約211万画素
	有効画素数	約201万画素
	電子シャッター	AUTO, MANUAL
記録	記録媒体	コンパクトフラッシュ
	画素形式	圧縮時(JPEG)
	記録画素数	1600×1200ピクセル
本体	対物レンズ倍率	×100, 200, 300, 400, 500, 600
	計測	自動測定、距離測定、面積測定など

(8) 硬度計 島津製作所 HMV-2000 形

母材、放電荒加工面また超高速ミーリング加工後の硬度を測定を行なう。

測定方法として、加工工程ごとに 5 回測定を行いその平均より硬さを求める。



図 2.9 硬度計の外観写真

表 2.5 硬度計の主な仕様

圧子	対面角136° ダイヤモンド 正四角錐圧子
視準方式	両サイド 個別視準方式
検出器	オプティカルエンコーダ
有効測定長さ	200 μ m

2.2 実験装置接続図

形彫放電加工機で荒加工を行い、加工後に超高速ミーリングユニットを形彫放電加工機にワンタッチで装着することができ、仕上げ加工を行うシステムの概要図が図 2.10 である。高速スピンドルユニットにボールエンドミルを装着し仕上げ加工を行うものである。またこの高速ミーリング加工機には 6 軸 Force/Torque センサを装着しており加工時の Force 及び Torque を測定できるものである。

高速スピンドルは、有線にてコントロールユニットに接続されており、このコントロールユニットから回転数の制御及びエアの供給を行なうことが出来る。

加工中の X,Y,Z の力は 6 軸 Force/Torque センサからパソコンに転送でき、単位換算して画面に数値と擬似模型で表示すると共に、得られてデータを記録し解析することができる役割を持っている。

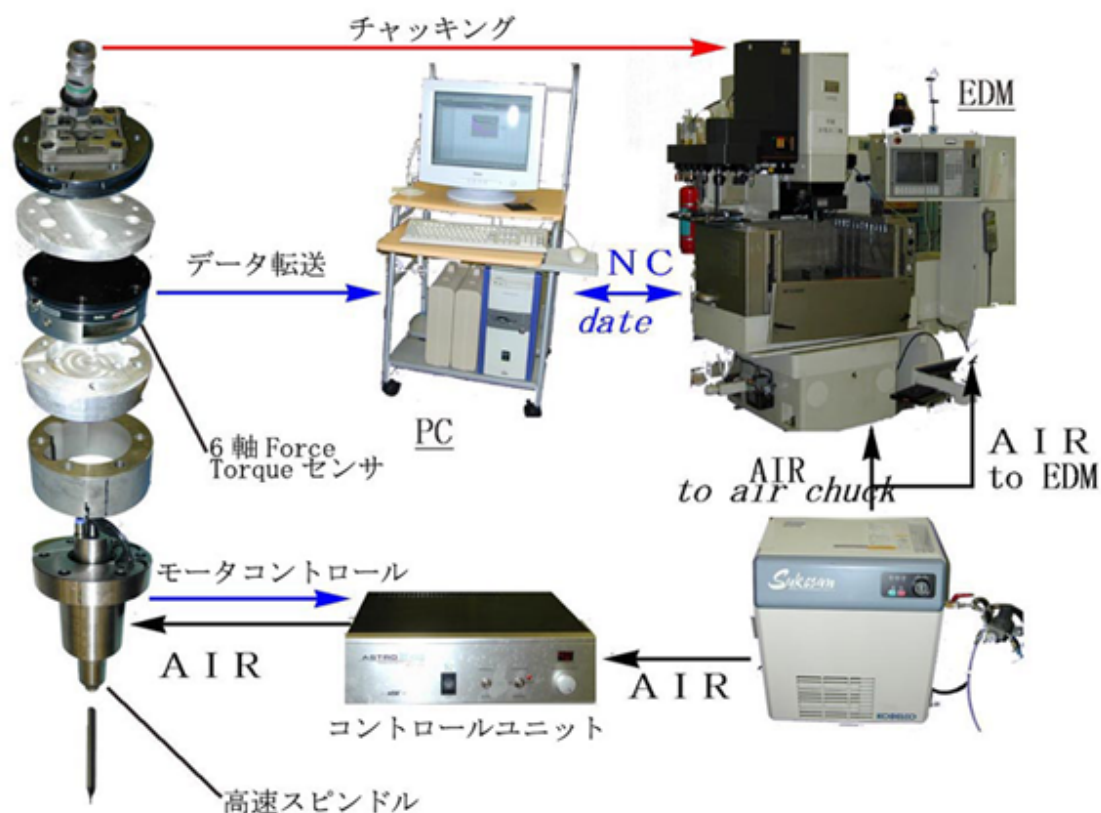


図 2.10 実験装置全体図

2.3 6 軸センサ概要

Force/Torque センサを加工機軸のスピンドルにスペーサーを用いて取り付けており、センサからのデータは ISA-BUS カードを用いパソコンでリアルタイムに表示・保存することが可能である。次に、図 2.11 にセンサにおける Force/Torque の向きを示した。本論文では Force を F と略称し、Torque を T と略称する。また、各々の方向に対する成分を x, y, z と規定して、 F_x 、 T_x のように呼ぶこととする。図の手前側が加工機の手前にあたり、それぞれの軸に対して図のように方向を定義するものとする。測定は、5 分間行いサンプルレートは 100Hz で測定した。



図 2.11 Force/Torque センサ定義

3.切り込み量とボールエンドミルの磨耗について

3.1 実験概要

本実験では、放電荒加工面に超高速回転ミーリング加工を行い、切込み深さとボールエンドミルの磨耗についての実験を行なう。放電荒加工面は $15[\mu\text{m/Ry}]$ のワーク材料において切込み量(Z) $15, 25, 35\mu\text{m}$ と変化させながら加工を行ない、それぞれの切り込み深さごとの表面粗さ及び軸にかかる Force/Torque を測定し、ボールエンドミルの磨耗状態を調べる。最後に、放電加工のみで仕上げ加工まで行なった場合と、荒加工を放電加工で行い仕上げ加工をミーリング加工することによりどの程度の時間短縮ができるかを検討し複合加工の実用性を証明する。

3.2 実験方法

形彫放電加工機を用いワーク材質 SK-5 焼入れ鋼(HRC55)において荒加工を行い、放電荒加工面 $15[\mu\text{m/Ry}]$ のワークを製作し、切込み量(Z)の値を $15, 25, 35[\mu\text{m}]$ と変化させながら縦 $5\text{mm} \times$ 横 5mm の正方形を図 3.1 に示すように走査線状に超高速ミーリングを行なった。本実験は、表 3.1 に示す加工条件を一定とした中で、加工深さを変化させながら実験を行なった。

表 3.1 実験条件

被加工物	SK5(HRC55)
電極材料	CU
送り[mm/min]	100
主軸回転数[rpm]	40000
ピック量 $\gamma[\mu\text{m}]$	10
ボールエンドミル直径[mm]	0.8
加工液面高さ[mm]	20
切り込み量Z $[\mu\text{m}]$	15,25,35
加工面 $[\mu\text{m/Ry}]$	15

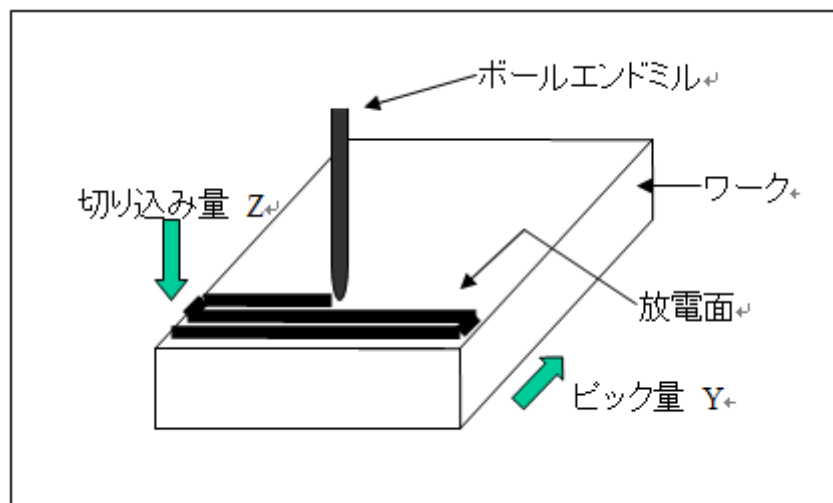


図 3.1 高速スピンドルの移動方向

図 3.2 は高速スピンドルの図であり図 3.2 の拡大部分を図 3.3 に示す。図 3.3 の写真より、ボールエンドミルの長さはスピンドルのチャック部分からボールエンドミルの先端まで 30mm と設定し今回高速ミーリング加工を行なう。



図 3.2 高速スピンドル全体図



図 3.3 左の図の拡大部分

3.3 ボールエンドミルの磨耗についての実験

近年技術進歩により金型を製作する場合、超硬エンドミルでなければ切削加工できない被削材が増えてきた。また超硬エンドミルは高温強度と硬さが高く、高速切削や高硬度材の切削に適しているため工具の寿命が長く加工可能である。そのため今回、仕上げ加工を行う場合、放電荒加工面 $15[\mu\text{m/Ry}]$ から仕上げ加工 $1[\mu\text{m}]$ までの加工を超硬ボールエンドミルを使用して加工をおこなった。その場合ボールエンドミルの磨耗状態がどのように変化するかは非常に重要になってくる。そこで今回、放電荒加工面 $15[\mu\text{m/Ry}]$ に切込み量(Z)を $15, 25, 35[\mu\text{m}]$ と変化させた場合に、どのようにエンドミルが磨耗していくか、また直線距離で何メートル加工すればエンドミルが磨耗し切れなくなるかについて、実験をおこなう。

測定方法として、図 2.8 にあるような 3D デジタルファインスコープを使用し、図 3.4 で示しているような方向から測定をおこなう。測定例として図 3.5 に示す。

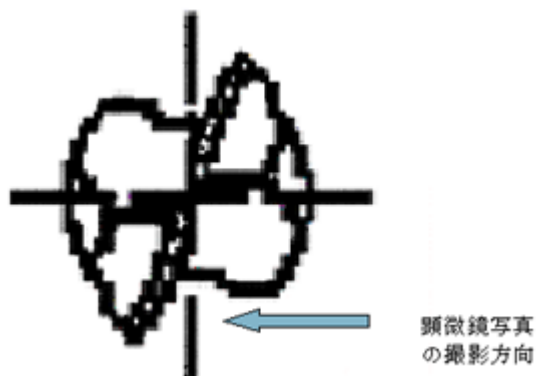


図 3.4 3D デジタルファインスコープ測定方向

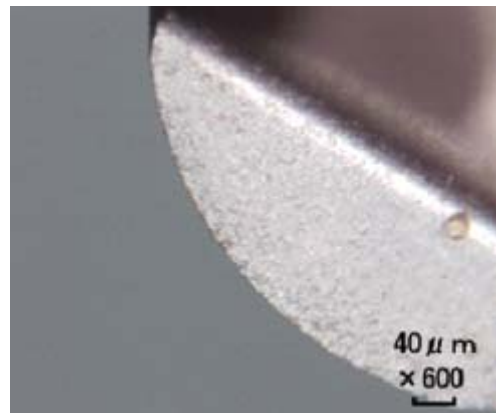


図 3.5 測定例の写真

3.4 放電荒加工面 15 $\mu\text{m/Ry}$ に切込み量(Z)におけるグラフの評価方法

図 3.6 に Force/Torque のグラフの評価を例で示す。図中における A は、加工スタート前 40000rpm の状態をあらわしており、B については、ボールエンドミルがワークに切込み量(Z)加工した時の状態である。以下 B の加工を(First Approach と略称)以後、往復加工を繰り返しているためグラフの周期が一定になっている。

図 2.2 の高速スピンドルユニットのチャック部分にかかる Force[X,Y]方向の最大は 6[Ncm]が限界である。今回の加工では図 3.3 にも書いてあるようにチャック部分から 3[cm]ボールエンドミルの先端までストロークがあるためボールエンドミルの先端部分にかかる Force[X,Y]方向は 1.5[Ncm]以下で加工を行なわなければ高速スピンドルユニットに負荷がかかってしまう。そこで今回、往復加工時の Force[X,Y]が 1.5[Ncm]以下で加工を行なうことを前提に考え加工を行なった。

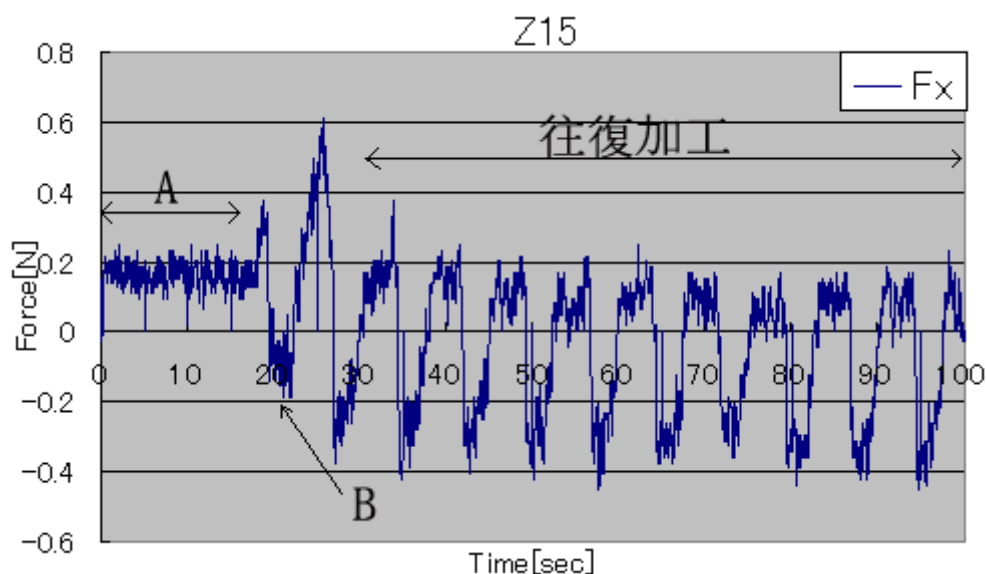


図 3.6 Force/Torque グラフの評価概要

3.5 実験結果

3.5.1 放電荒加工面 15[$\mu\text{m/Ry}$]に切込み量 15 μm 加工の実験結果

(1) 顕微鏡写真による刃の磨耗実験結果

放電荒加工面 15[$\mu\text{m/Ry}$]において切り込み量 15 μm 加工時の場合、ボールエンドミル先端の写真を以下に示す。図 3.7 新品エンドミルと図 3.9 加工距離 10m ボールエンドミル先端部分を比較しても分かるように 10m 加工で、少し先端部分が磨耗していることが写真より分かる。さらに、図 3.10 加工距離 20m 図 3.11 加工距離 30m と加工するにつれて磨耗が進み加工距離 30m では加工時に耳で聞いても分かる程度に音が発生するようになり、超高速ミーリング加工機にも相当の熱をもつようになったため切り込み量 15 μm の加工では直線距離で 30m 加工すればエンドミルが磨耗し加工の限界であると判断できる。

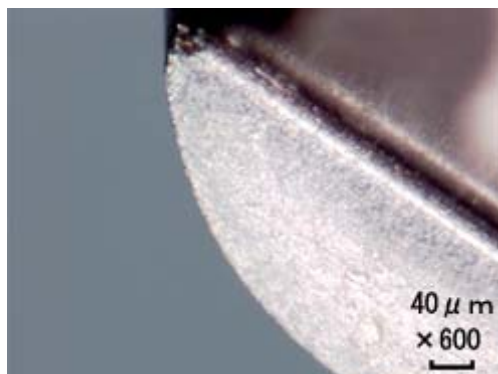


図 3.7 新品のエンドミル

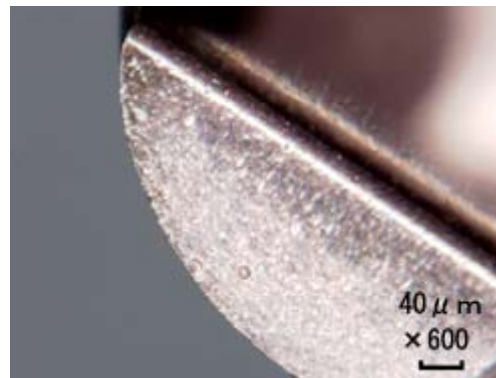


図 3.8 加工距離 2.5m

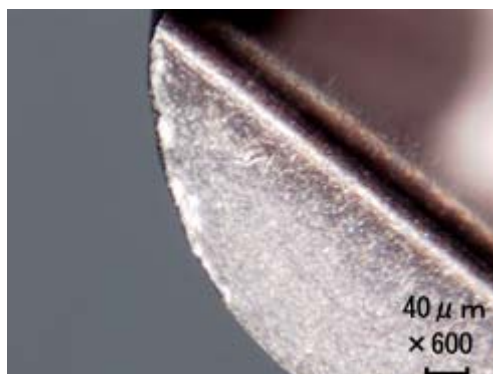


図 3.9 加工距離 10m

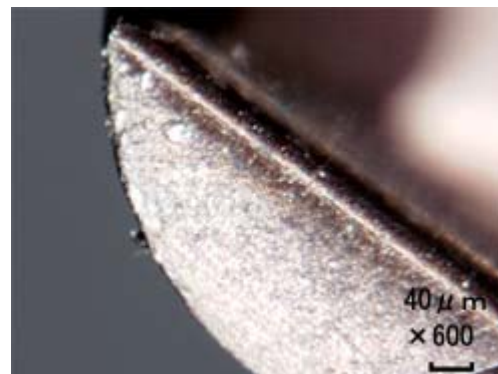


図 3.10 加工距離 20m

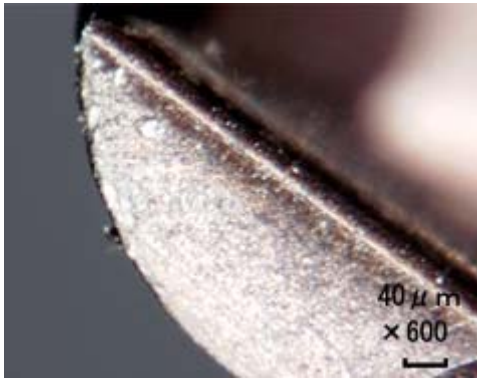


図 3.11 加工距離 30m

(2)顕微鏡写真によるワークの表面結果

放電荒加工面 $15[\mu\text{m/Ry}]$ において、超高速ミーリング加工後のデジタル顕微鏡写真を以下に示す。まず超高速ミーリング加工前の放電荒加工面における顕微鏡写真を図 3.12 に示し、切り込み量一定(Z) $15[\mu\text{m}]$ で加工距離 2.5,10,20,30[m]ごとの顕微鏡写真を図 3.13～図 3.16 に示す。加工距離が短い方がボールエンドミルの磨耗もなく表面が精度良く加工できると思われがちである。しかし図 3.13 を見ても分かるがカッター筋の表面に凹凸が目立つように見える。次に図 3.14 の表面写真を見ると図 3.13 の表面より凹凸が少なくなっているように見える。さらに加工距離を伸ばし図 3.16 加工距離 30m の表面写真は図 3.15 加工距離 20m より表面の凹凸が少なくなり精度の良い表面が得られているように思える。切り込み量 $15\mu\text{m}$ 加工後の顕微鏡写真より判断できることは加工距離が少し伸び、ボールエンドミルが磨耗した方の表面写真が精度良く加工できていることが顕微鏡写真より判断できる。

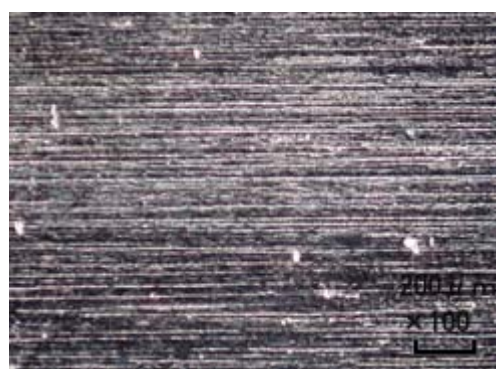
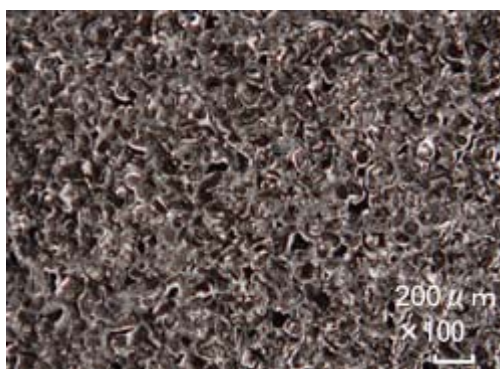


図 3.12 放電荒加工面 $15\mu\text{m/Ry}$ の表面写真 図 3.13 加工距離 2.5m

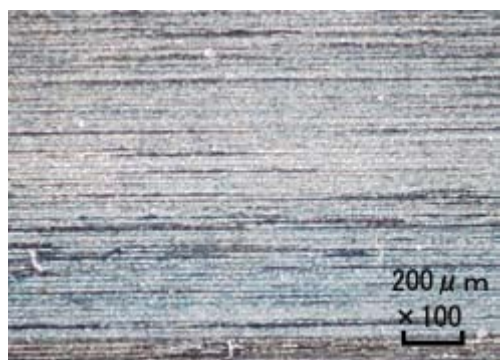


図 3.14 加工距離 10m



図 3.15 加工距離 20m

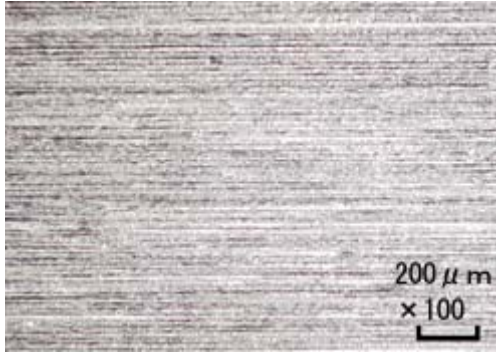


図 3.16 加工距離 30m

(3) ミーリング加工後における表面粗さの実験結果

放電荒加工面 $15[\mu\text{m/Ry}]$ に切込み量(Z) $15\mu\text{m}$ 高速ミーリング加工後の表面粗さは、平行方向での最大値が $1.1\mu\text{m}$ ～最小値 $0.6\mu\text{m}$ の間で表面粗さが変化していることが下のグラフより判断できる。また垂直方向は最大値 $2.3\mu\text{m}$ ～最小値 $1.3\mu\text{m}$ の間で変化していることが判断できる。ワークの表面写真より平行方向は $1.1\mu\text{m}$ 以内、垂直方向でも $2.3\mu\text{m}$ とどちらの方向の表面粗さも良い面が得られていることが分かる。

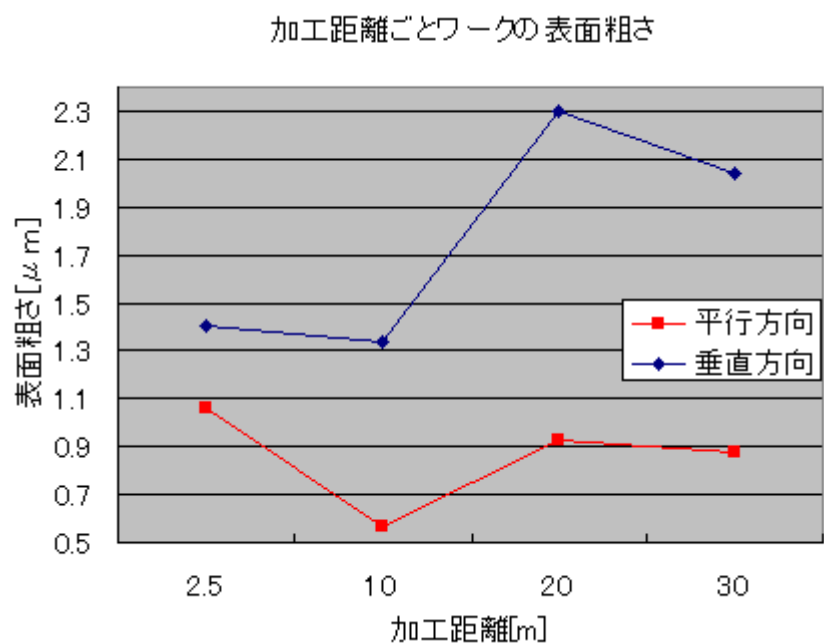


図 3.17 加工距離とワークの表面粗さ

(4) センサによる Force/Torque の測定結果

次に、Force/Torque のグラフを図 3.18～図 3.41 に示した。Force/Torque の測定は、非接触で 40000rpm 状態で加工を開始し、約 40 秒後に測定を開始した。

Force[X]方向の力

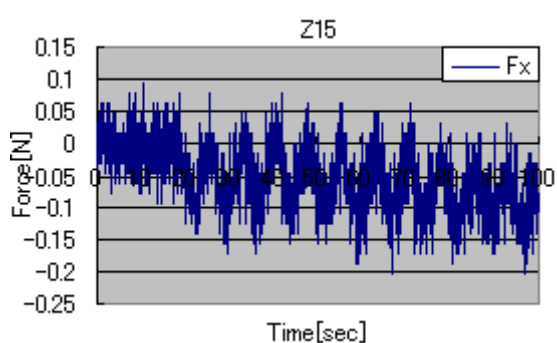


図 3.18 加工距離 2.5m

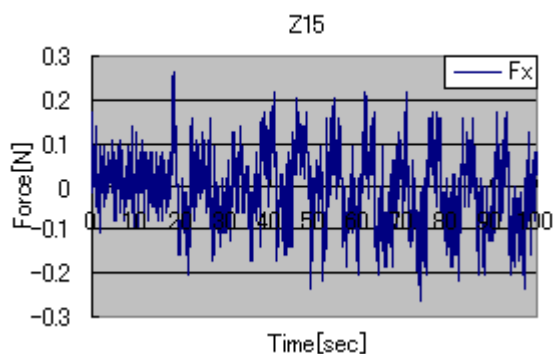


図 3.19 加工距離 10m

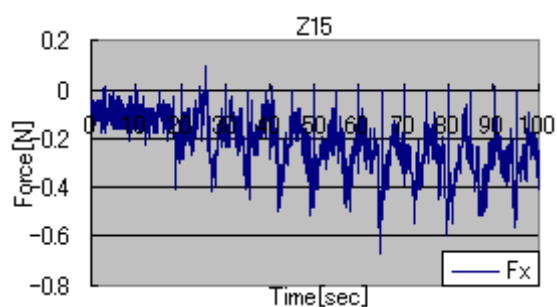


図 3.20 加工距離 20m

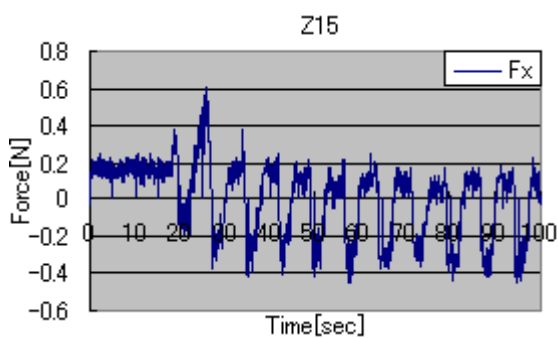


図 3.21 加工距離 30m

Force[Y]方向の力

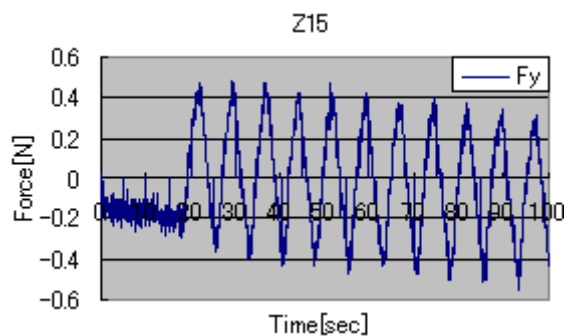


図 3.22 加工距離 2.5m

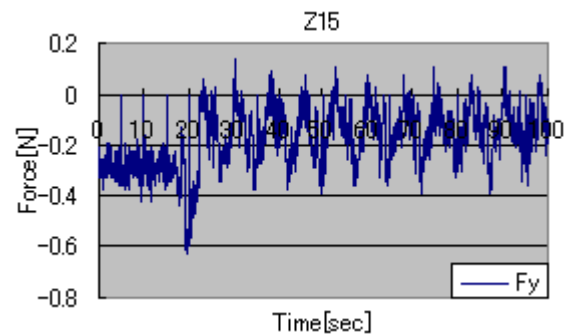


図 3.23 加工距離 10m

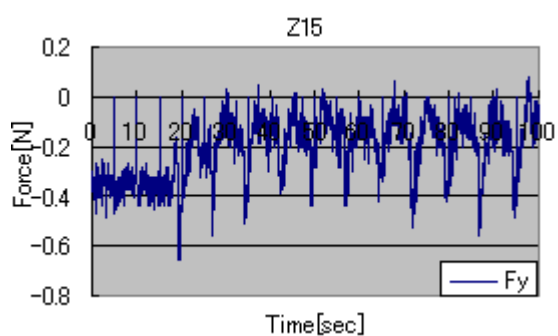


図 3.24 加工距離 20m

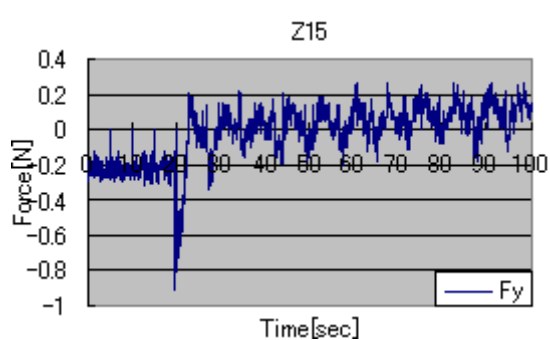


図 3.25 加工距離 30m

Force[Z]方向の力

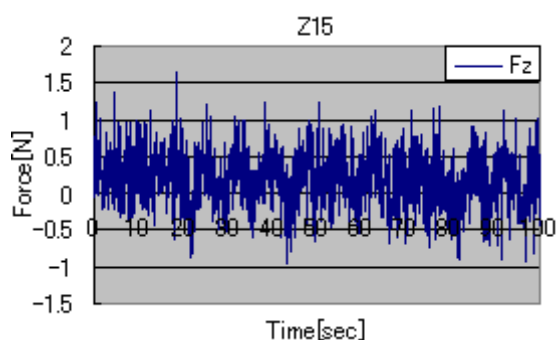


図 3.26 加工距離 2.5m

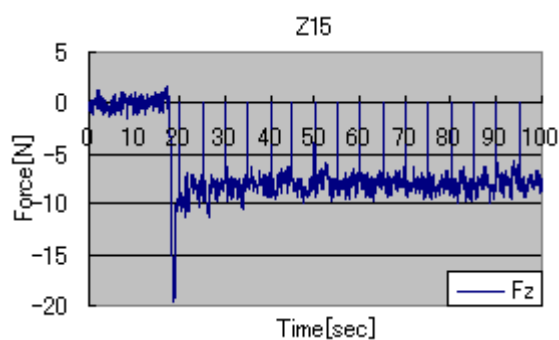


図 3.27 加工距離 10m

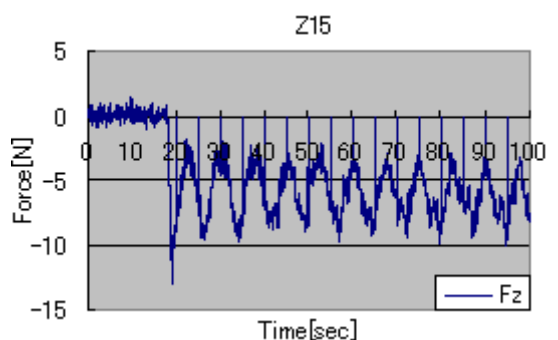


図 3.28 加工距離 20m

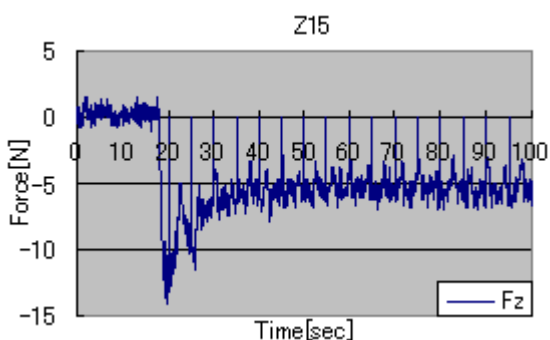


図 3.29 加工距離 30m

Torque[X]方向の力

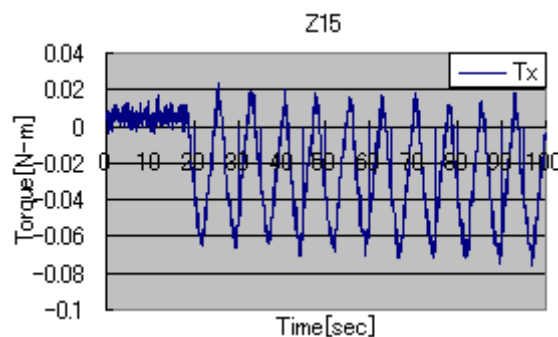


図 3.30 加工距離 2.5m

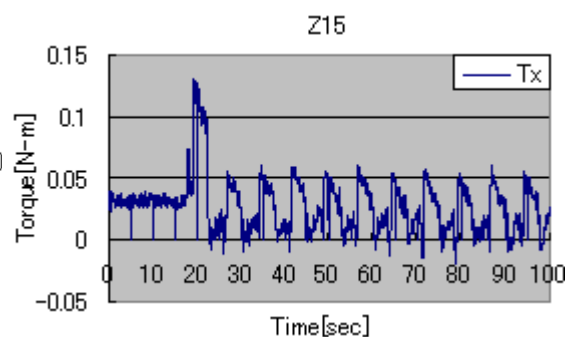


図 3.31 加工距離 10m

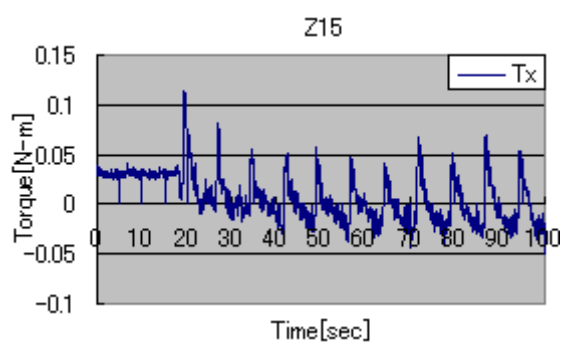


図 3.32 加工距離 20m

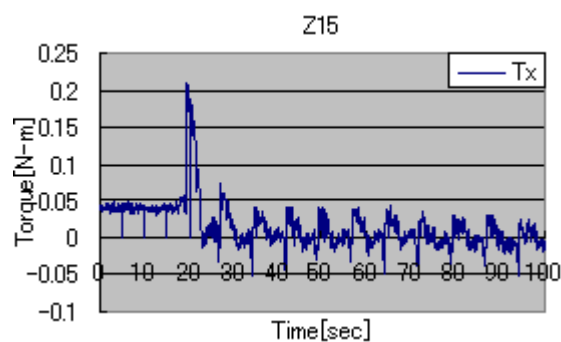


図 3.33 加工距離 30m

Torque[Y]方向の力

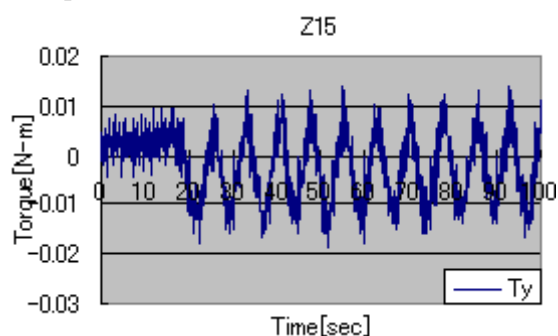


図 3.34 加工距離 2.5m

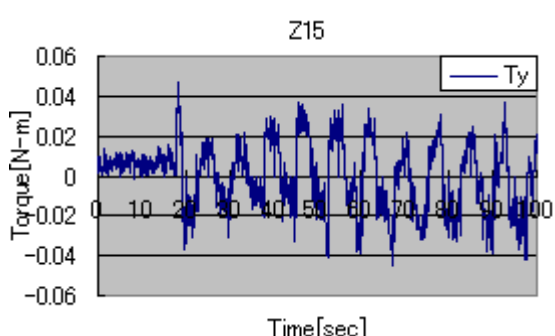


図 3.35 加工距離 10m

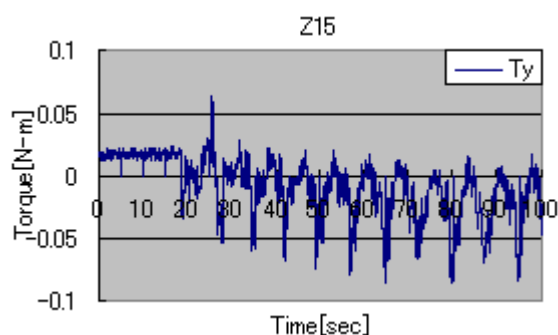


図 3.36 加工距離 20m

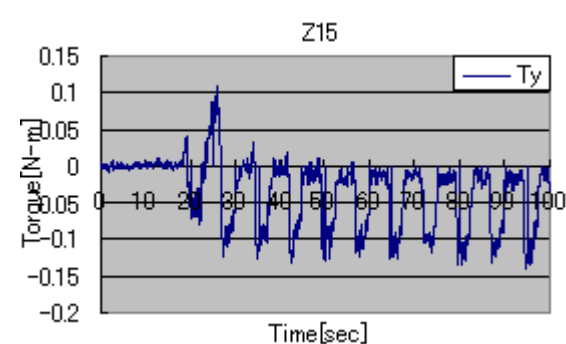


図 3.37 加工距離 30m

Torque[Z]方向の力

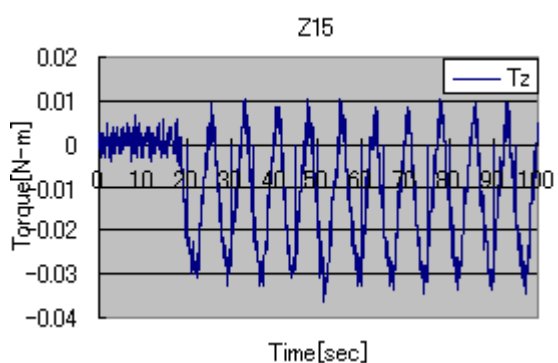


図 3.38 加工距離 2.5m

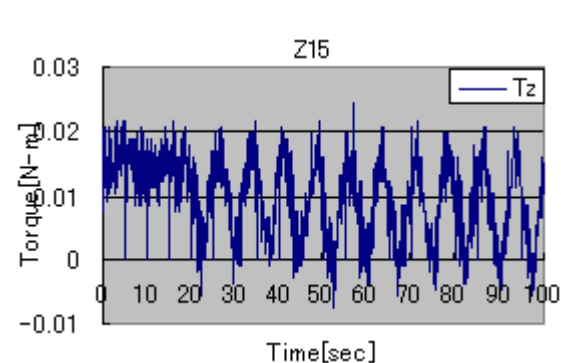


図 3.39 加工距離 10m

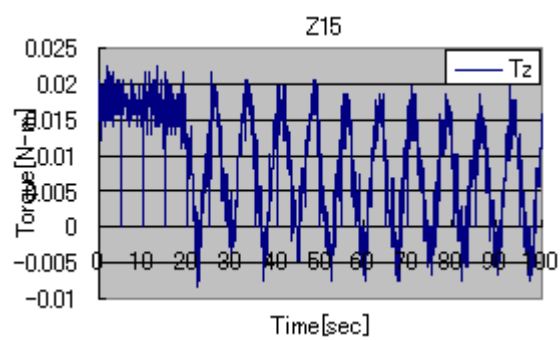


図 3.40 加工距離 20m

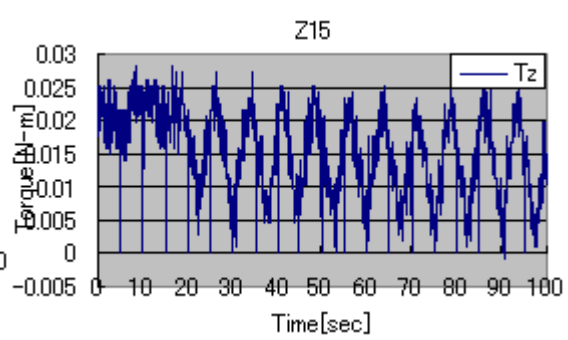


図 3.41 加工距離 30m

(5)切込み量 15 μ m加工においての実験結果

下の図 3.42 は図 3.18～図 3.29 の Force[Fx,Fy,Fz]の往復加工時の平均値を加工距離ごとにグラフ化したものである。図 3.42 の Force グラフより、加工距離が変化すれば当然ボールエンドミルの磨耗が進むため Force[Fx,Fy]が増加傾向になると判断しがちであるが、今回[Fx,Fy]共に 1[N]以下で加工が出来ていることが分かる。また[Fz]の Force は最大 10[N]と力がかかっているように思われがちであるが、放電加工機は Z 方向の力は非常に強いいためこの値はあまり重要ではない。以上の点より SK-5 焼入れ鋼 (HRC55)に切込み量 15 μ m加工は十分加工可能であることが分かる。

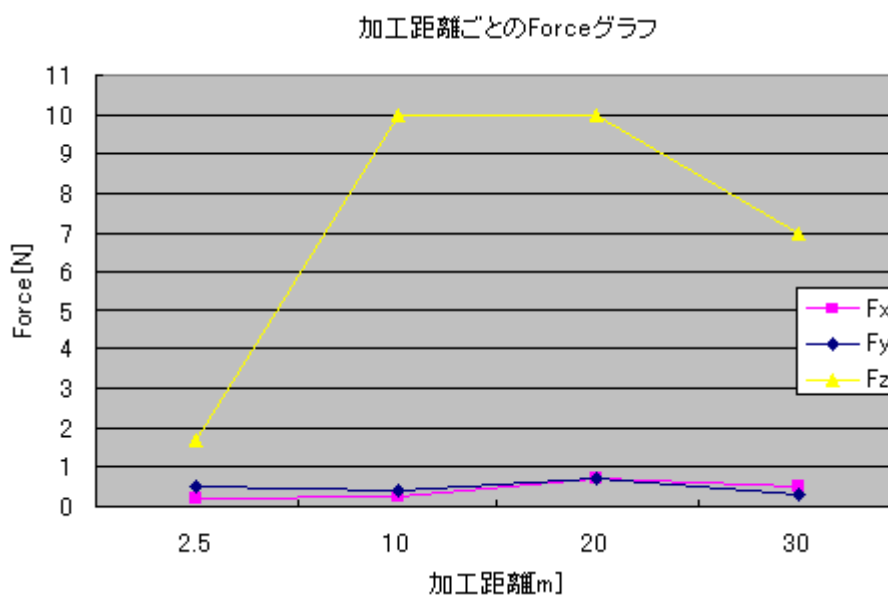


図 3.42 加工距離と Force の関係

図 3.43 は図 3.30～図 3.41 の Torque[Tx,Ty,Tz]の往復加工時の平均値をそれぞれグラフ化したものである。Torque のグラフを見ても分かるように Tx の最大値が 0.08[N-m],Ty の最大値 0.13[N-m],Tz の最大値 0.035[N-m]とさほど大きな力がかかっていないことから Torque の値は無視できる値にあることが分かる。

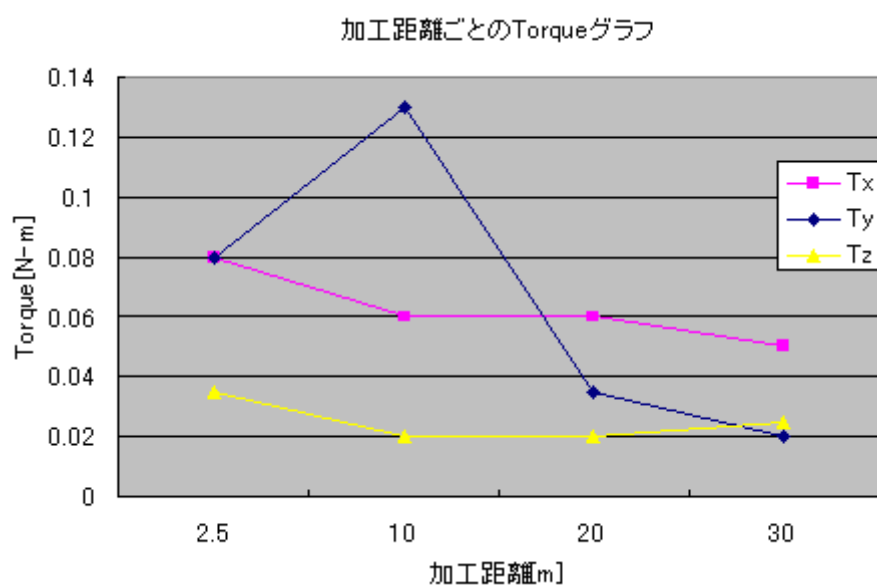


図 3.43 加工距離と Torque の関係

3.5.2 放電荒加工面 15[$\mu\text{m/Ry}$]に切り込み量 25 μm 加工後の実験結果

(1)顕微鏡写真による刃の磨耗結果

放電荒加工面 15[$\mu\text{m/Ry}$]において切り込み量 25 μm 加工時の場合、ボールエンドミル先端の写真を下に示す。図 3.44 新品のエンドミルと図 3.46 加工距離 10m 加工後のボールエンドミルを比較しても分かるように 10m 加工で、ボールエンドミルの先端が少し磨耗していることが写真より分かる。さらに、図 3.47 加工距離 20m 図 3.48 加工距離 30m と加工距離が進むにつれて磨耗が激しくなり加工距離 30m では、ボールエンドミルの先端部分の R がなくなりかなり磨耗していることがデジタル顕微鏡写真からも分かる。また加工時に耳で聞いて分かる程度に音が発生するようになり、超高速ミーリング加工機にも相当の熱をもつようになったため切り込み量 25 μm の加工では直線距離で 30m 加工すればエンドミルが磨耗し加工出来なくなることが顕微鏡写真より判断できる。

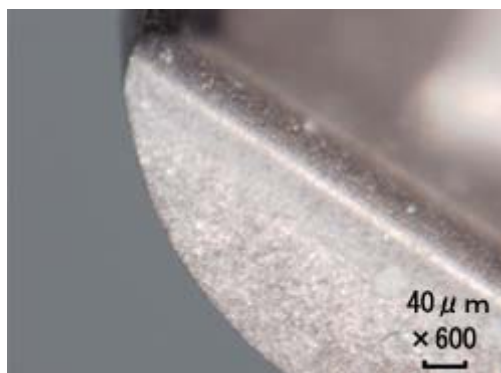


図 3.44 新品のエンドミル

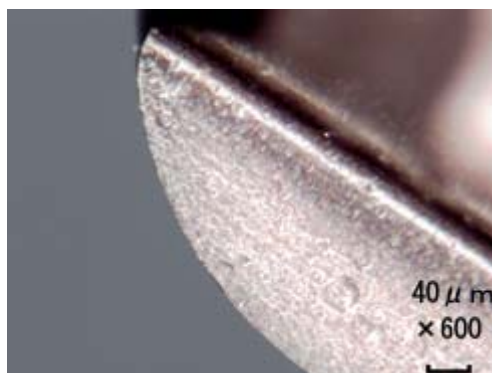


図 3.45 加工距離 2.5m

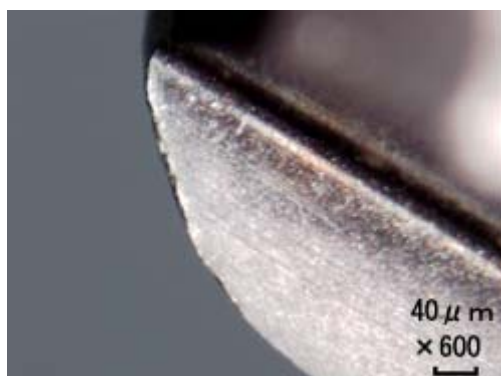


図 3.46 加工距離 10m

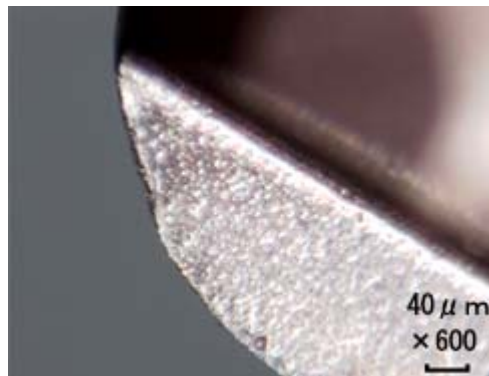


図 3.47 加工距離 20m

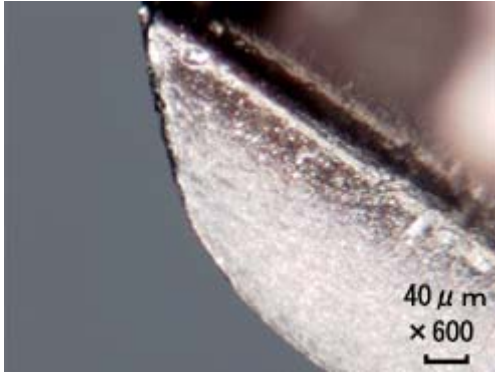


図 3.48 加工距離 30m

(2) 顕微鏡写真によるワークの実験結果

放電荒加工面 $15[\mu\text{m/Ry}]$ における超高速ミーリング加工後のデジタル顕微鏡写真を以下に示す。まず超高速ミーリング加工前の放電荒加工面における顕微鏡写真を図 3.49 に示し、切り込み量一定(Z) $25[\mu\text{m}]$ 、加工距離 $2.5, 10, 20, 30[\text{m}]$ 加工ごとの顕微鏡写真を図 3.50～図 3.53 に示す。図 3.50 を見てみると、表面の凹凸が激しく荒い面であるのに対し図 3.51、図 3.52 と加工距離が伸びていくにつれ表面の凹凸が少なくなっていることが顕微鏡写真より判断できる。しかしある一定加工をするとエンドミルが磨耗し図 3.53 のように表面に少し凹凸が目立つようになってくる。顕微鏡写真で判断すると切り込み量 $25[\mu\text{m}]$ の加工の場合、加工距離 20m が表面の凹凸が最小であると判断できる。

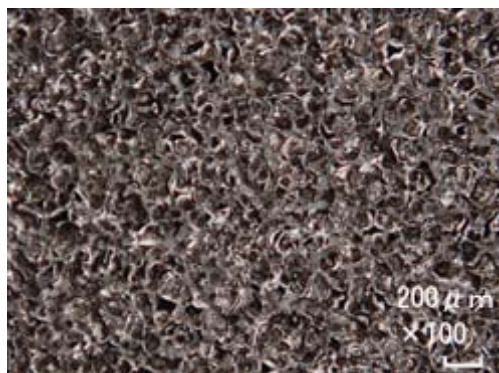


図 3.49 放電荒加工面 $15 \mu\text{m/Ry}$ の表面写真 図 3.50 加工距離 2.5m

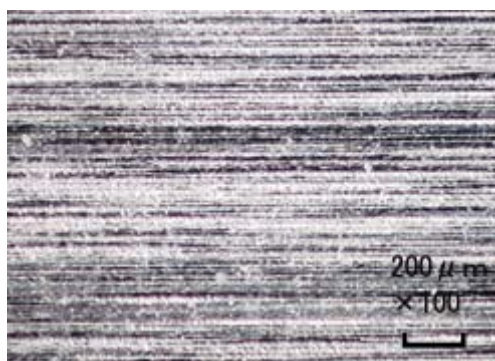


図 3.51 加工距離 10m



図 3.52 加工距離 20m

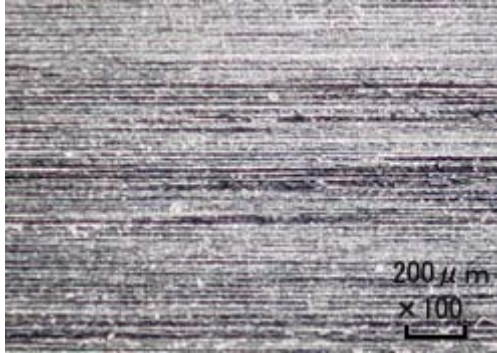


図 3.53 加工距離 30m

(3) ミーリング加工後における表面粗さの実験結果

放電荒加工面 $15[\mu\text{m/Ry}]$ に切込み量(Z) $25\mu\text{m}$ 高速ミーリング加工後の表面粗さは、平行方向での最大値が $1\mu\text{m}$ ～最小値 $0.6\mu\text{m}$ の間で表面粗さが変化していることが下のグラフより判断できる。また垂直方向は最大値 $2.6\mu\text{m}$ ～最小値 $1.3\mu\text{m}$ の間で変化していることが判断できる。ワークの表面粗さより平行方向は $1.1\mu\text{m}$ 以内、垂直方向でも $2.6\mu\text{m}$ 以下とどちらの方向の表面粗さも良い面が得られていることが分かる。

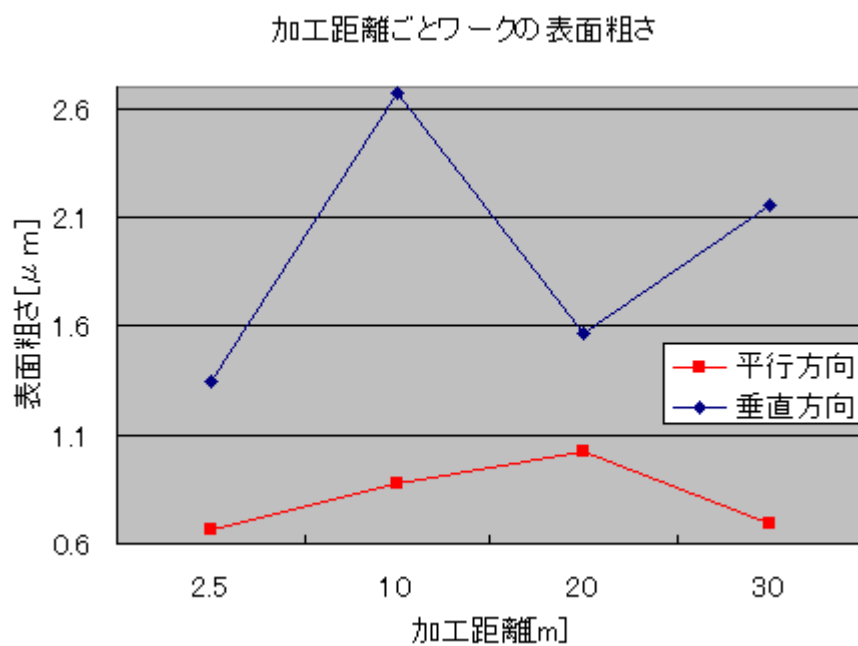


図 3.54 加工距離とワークの表面粗さ

(4) センサによる Force/Torque の測定結果

次に、Force/Torque のグラフを図 3.55～図 3.78 に示した。Force/Torque の測定は、非接触で 40000rpm 状態で加工を開始し、約 40 秒後に測定を開始した。

Force[X]方向の力

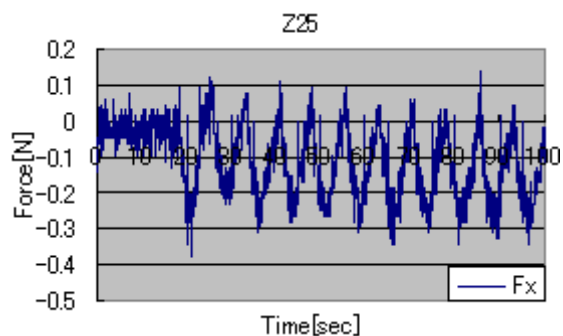


図 3.55 加工距離 2.5m

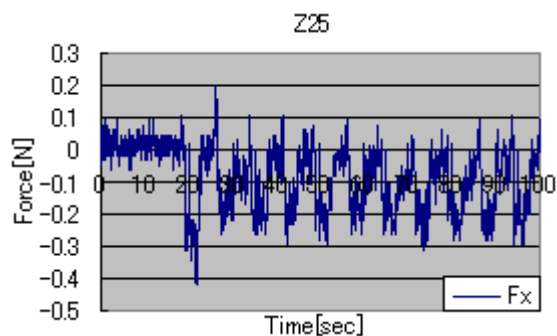


図 3.56 加工距離 10m

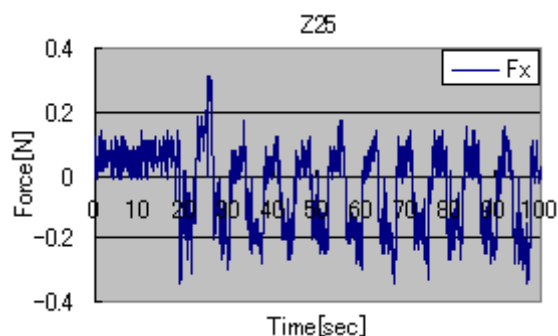


図 3.57 加工距離 20m

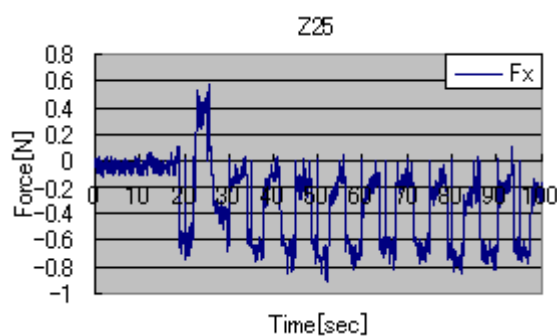


図 3.58 加工距離 30m

Force[Y]方向の力

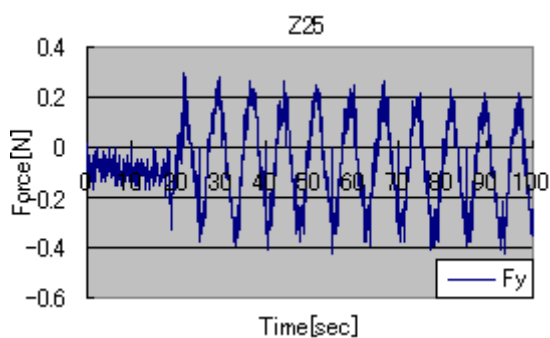


図 3.59 加工距離 2.5m

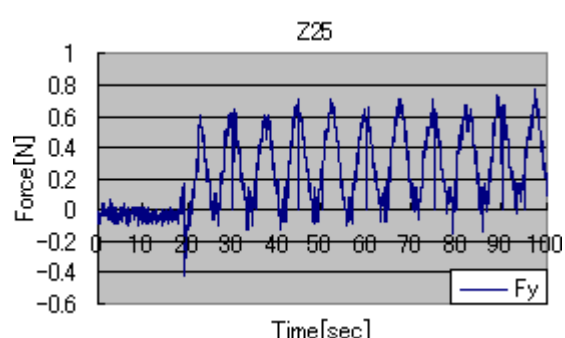


図 3.60 加工距離 10m

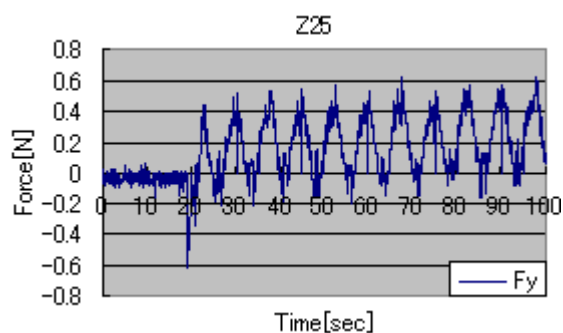


図 3.61 加工距離 20m

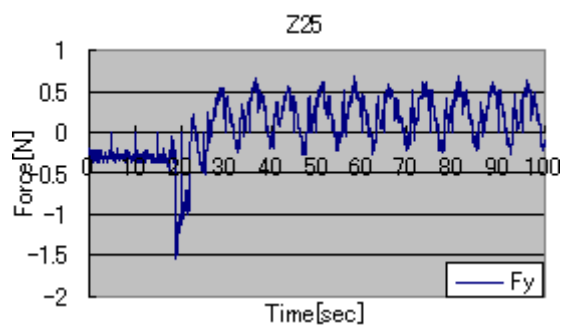


図 3.62 加工距離 30m

Force[Z]方向の力

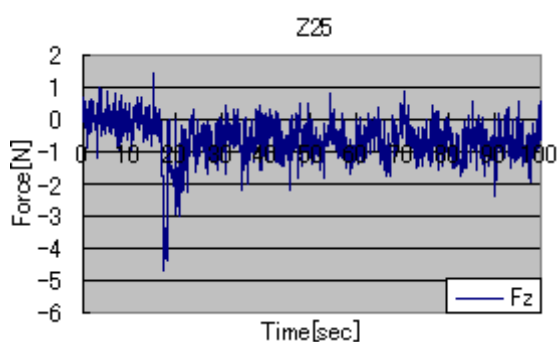


図 3.63 加工距離 2.5m

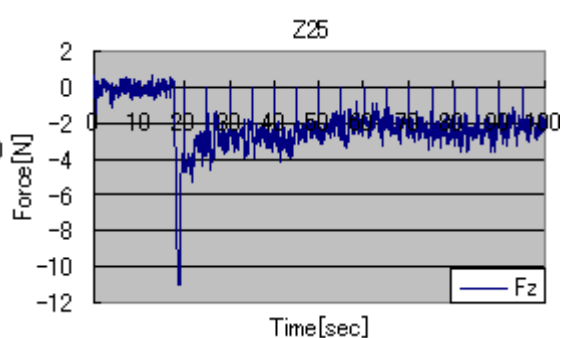


図 3.64 加工距離 10m

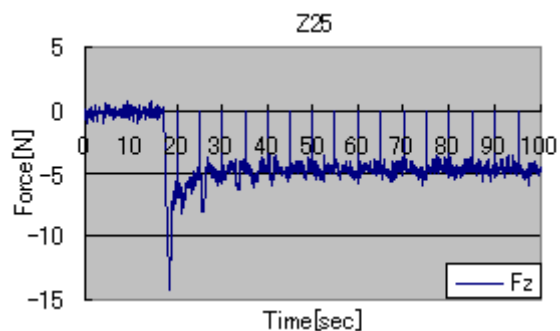


図 3.65 加工距離 20m

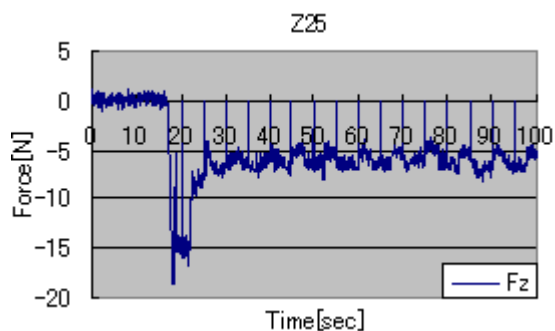


図 3.66 加工距離 30m

Torque[X]方向

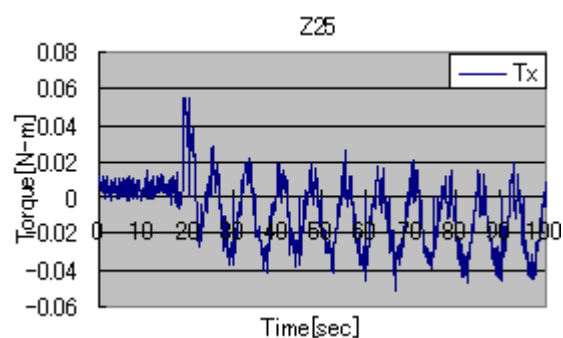


図 3.67 加工距離 2.5m

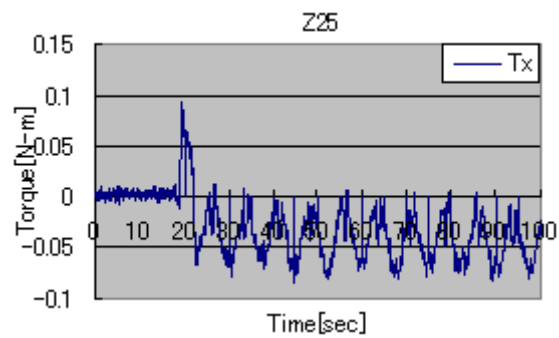


図 3.68 加工距離 10m

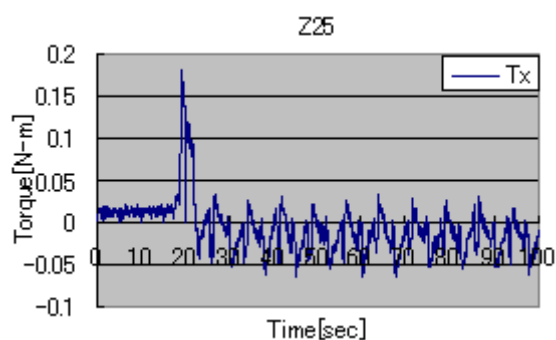


図 3.69 加工距離 20m

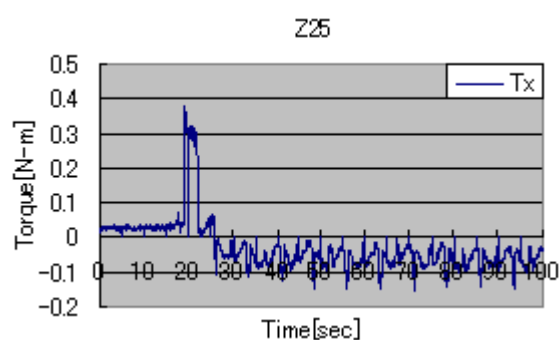


図 3.70 加工距離 30m

Torque[Y]方向の力

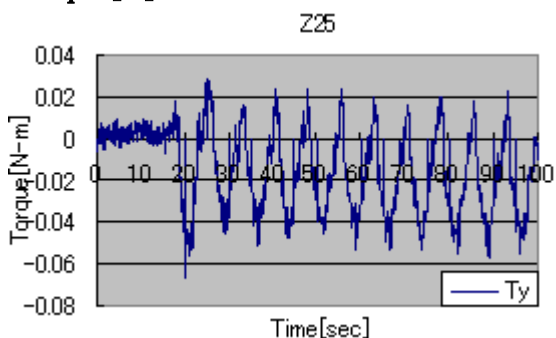


図 3.71 加工距離 2.5m

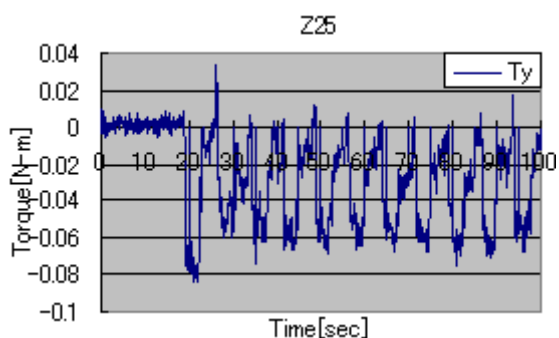


図 3.72 加工距離 10m

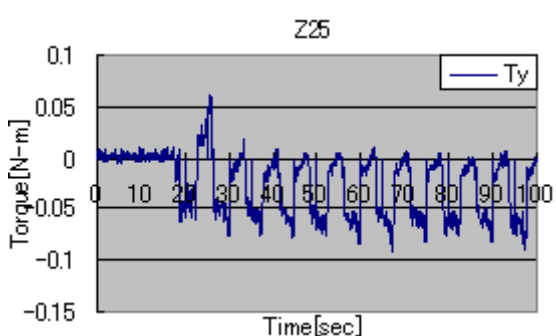


図 3.73 加工距離 20m

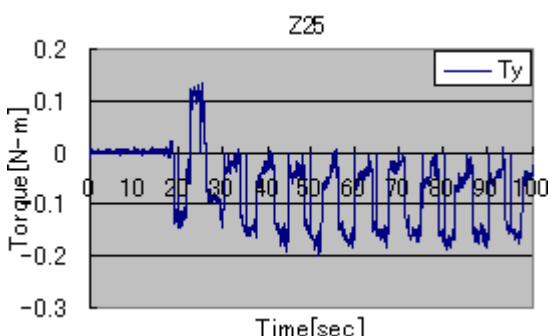


図 3.74 加工距離 30m

Torque[Z]方向の力

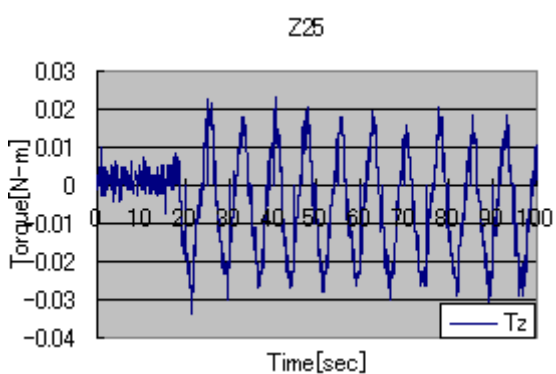


図 3.75 加工距離 2.5m

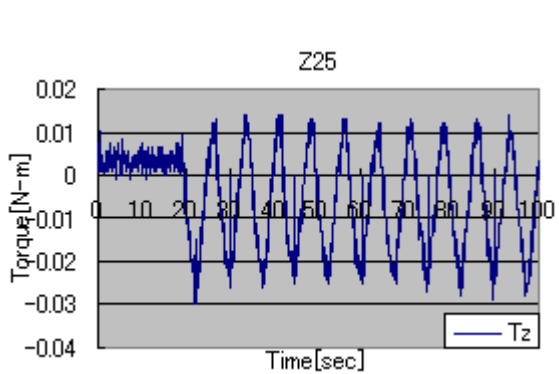


図 3.76 加工距離 10m

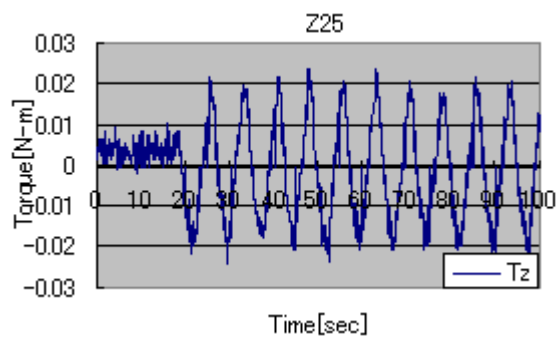


図 3.77 加工距離 20m

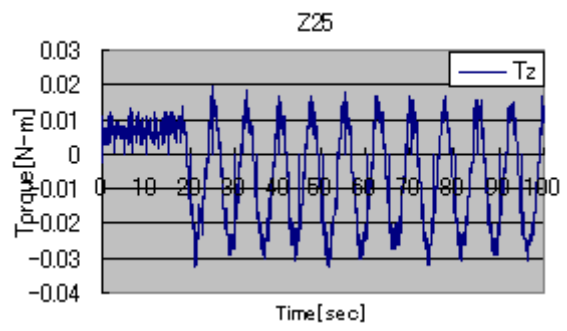


図 3.78 加工距離 30m

4.1 切込み量 25 μm 加工における実験結果

下の図 3.79 は図 3.55～図 3.66 の Force[Fx,Fy,Fz]の往復加工時の平均値を加工距離ごとにグラフ化したものである。図 3.79 の Force グラフより、加工距離が伸びれば当然ボールエンドミルの磨耗が進むため Force[Fx,Fy]も増加傾向になると判断しがちである。しかし今回[Fx,Fy]共に 1[N]以下で加工が出来ていることが下のグラフより分かる。また Fz の Force は最大値が 6[N]と力がかかっているように思われがちであるが、放電加工機は Z 方向の力は非常に強いいためこの値はあまり大きな値ではないことが分かる。以上の点より SK-5 焼入れ鋼(HRC55)に切込み量 25 μm 加工は十分加工可能であることが分かる。

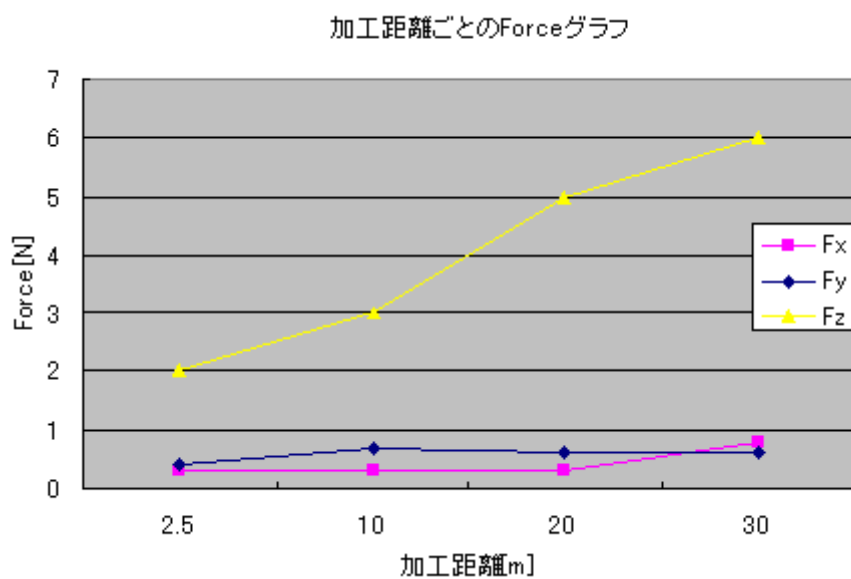


図 3.79 加工距離と Force の関係

図 3.80 は図 3.67～図 3.78 の Torque[Tx,Ty,Tz]の往復加工時の平均値をそれぞれグラフ化したものである。Torque グラフを見ても分かるように Tx の最大値が 0.08[N-m],Ty の最大値 0.2[N-m],Tz の最大値 0.035[N-m]とさほど大きな力がかかっていないことから切込み量 25 μ m 加工時の Torque の値は無視できる値にあることが分かる。

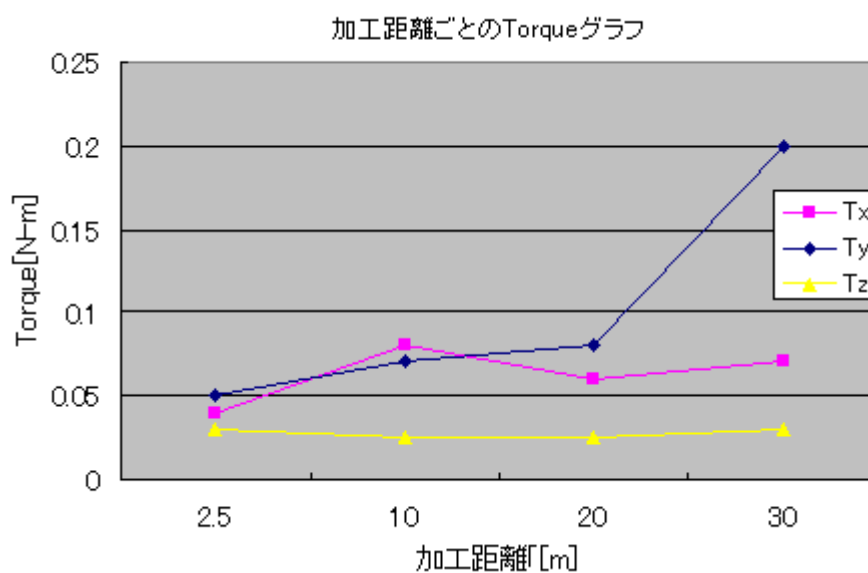


図 3.80 加工距離ごとの Torque グラフ

3.5.3 放電荒加工面 15[$\mu\text{m/Ry}$]に切込み量 35 μm 加工の実験結果

(1)顕微鏡写真による刃の磨耗実験結果

放電荒加工面 15[$\mu\text{m/Ry}$]において切り込み量 35 μm 加工時の場合、ボールエンドミル先端の写真を下に示す。図 3.81 新品のエンドミルと図 3.83 加工距離 5m ボールエンドミル先端部分を比較しても分かるように 5m 加工後のボールエンドミルの先端が少し磨耗していることが写真より分かる。さらに、図 3.84 加工距離 10m、図 3.85 加工距離 17.5m と加工距離が進むにつれて磨耗が激しくなり加工距離 17.5m では、ボールエンドミルの先端部分の R がなくなり先端部分に凹凸がはっきり分かる程度に磨耗していることがデジタル顕微鏡写真からはっきり分かる。また加工時に耳で聞いても分かる程度に音が発生するようになり、超高速ミーリング加工機にも相当の熱をもつようになったため切り込み量 35 μm の加工では直線距離で 17.5m 加工すればエンドミルが磨耗し加工が出来なくなるが顕微鏡写真より判断できる。

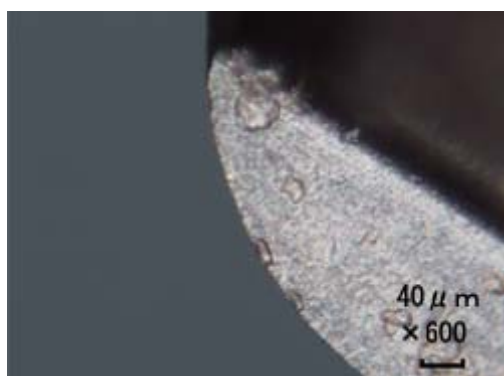


図 3.81 新品のエンドミル

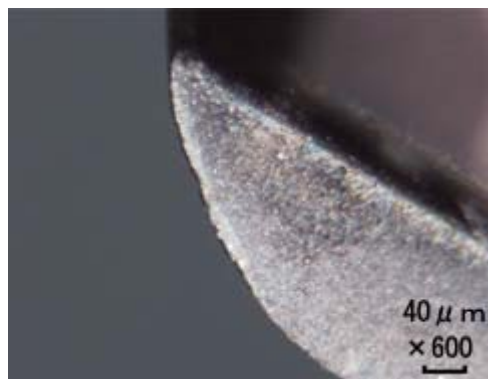


図 3.82 加工距離 2.5m

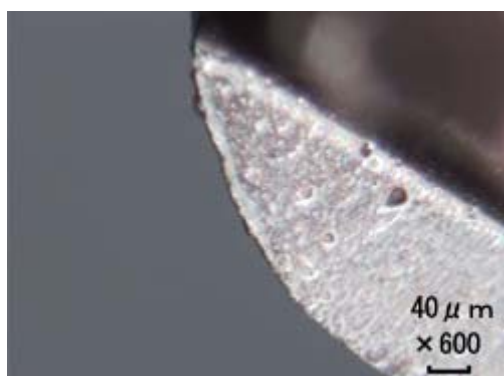


図 3.83 加工距離 5m

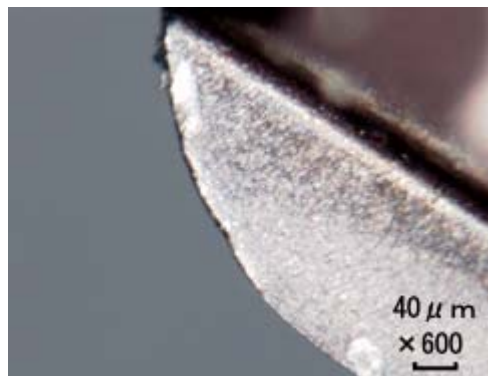


図 3.84 加工距離 10m

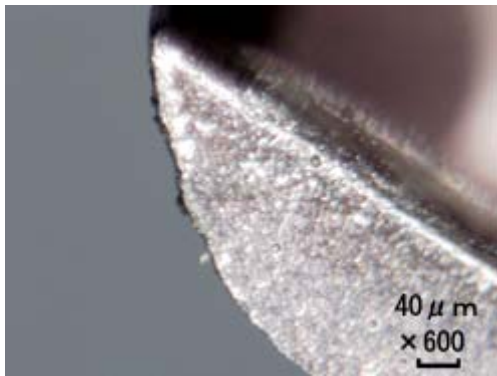


図 3.85 加工距離 17.5m

(2) 顕微鏡写真によるワークの実験結果

放電荒加工面 $15[\mu\text{m/Ry}]$ における超高速ミーリング加工後のデジタル顕微鏡写真を以下に示す。まず超高速ミーリング加工前の放電荒加工面における顕微鏡写真を図 3.86 に示し、切り込み量一定(Z) $35[\mu\text{m}]$ 加工距離 $2.5, 5, 10, 17.5[\text{m}]$ ごとの顕微鏡写真を図 3.87～図 3.90 に示す。図 3.87 を見ても分かるが、加工距離 2.5m 加工の場合、表面にビビリが起きたような表面に仕上がっていることが分かる。その後、加工距離を伸ばし図 3.88 の表面写真では綺麗な Cutter 筋がついている表面に仕上がっている。さらに図 3.89、図 3.90 と加工距離を伸ばすにつれてワークの表面が荒くなってきていることが分かる。顕微鏡写真より判断できることは、切込み量 $35\mu\text{m}$ の場合加工距離が 5m 前後の 때가一番表面が綺麗に仕上がっていることが分かる。

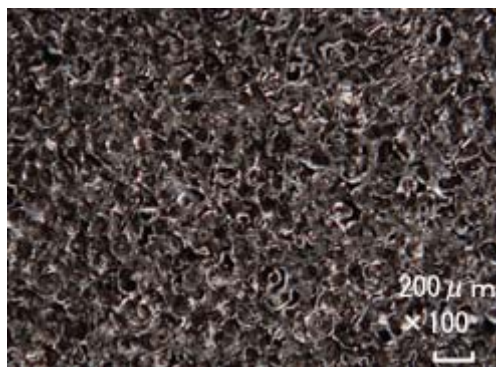


図 3.86 放電荒加工面 $15\mu\text{m/Ry}$ の表面写真



図 3.87 加工距離 2.5m



図 3.88 加工距離 5m



図 3.89 加工距離 10m

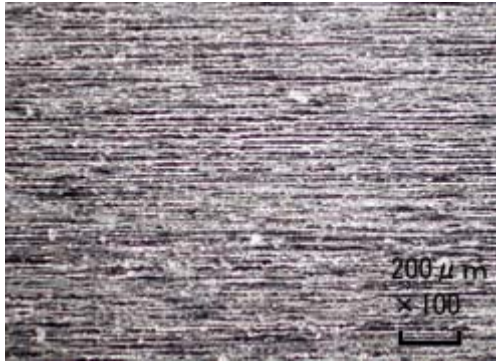


図 3.90 加工距離 17.5m

(3) ミーリング加工後における表面粗さの実験結果

放電荒加工面 $15[\mu\text{m/Ry}]$ に切込み量(Z) $35\mu\text{m}$ 高速ミーリング加工後の表面粗さは、平行方向での最大値が $1.1\mu\text{m}$ ～最小値 $0.8\mu\text{m}$ の間で表面粗さが変化していることが下のグラフより判断できる。また垂直方向は最大値 $1.7\mu\text{m}$ ～最小値 $1.3\mu\text{m}$ の間で変化していることが判断できる。ワークの表面粗さの実験結果より平行方向は $1.1\mu\text{m}$ 以内、垂直方向でも $1.7\mu\text{m}$ とどちらの方向の表面粗さも良い面が得られていることが分かる。

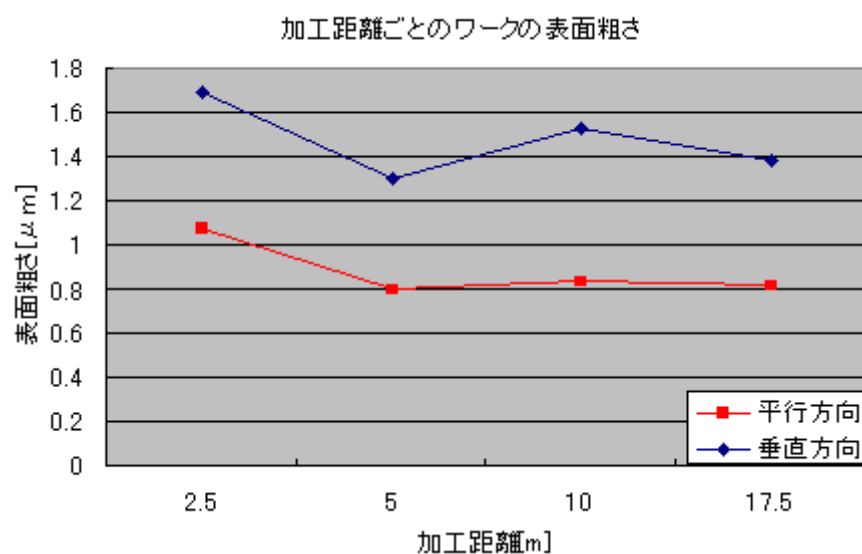


図 3.91 加工距離ごとのワークの表面粗さ

(4) センサによる Force/Torque の測定結果

次に、Force/Torque のグラフを図 3.92～図 3.103 に示した。Force/Torque の測定は、非接触で 40000rpm 状態で加工を開始し、約 40 秒後に測定を開始した。

Force[X]方向

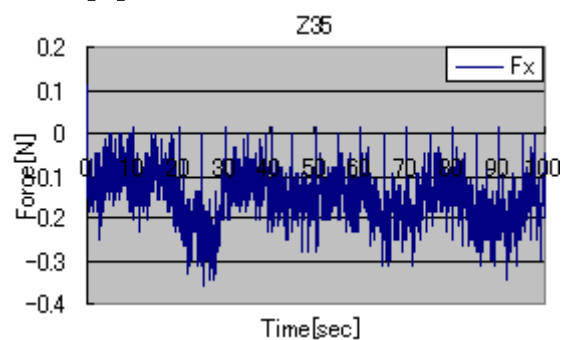


図 3.92 加工距離 2.5m

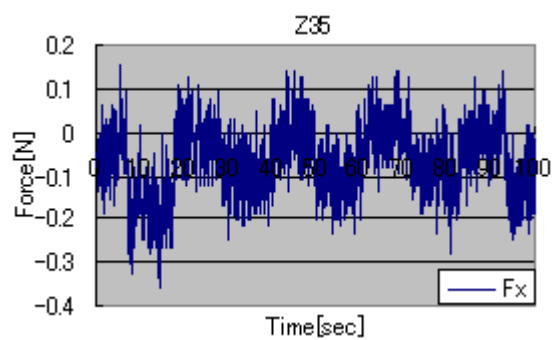


図 3.93 加工距離 5m

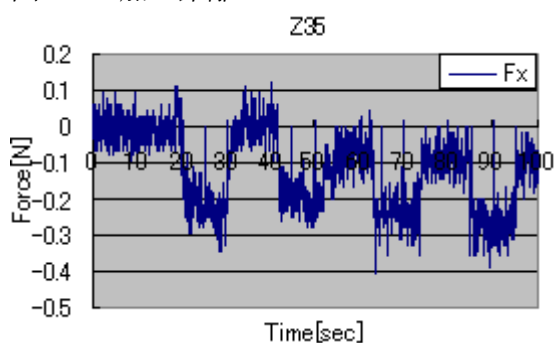


図 3.94 加工距離 10m

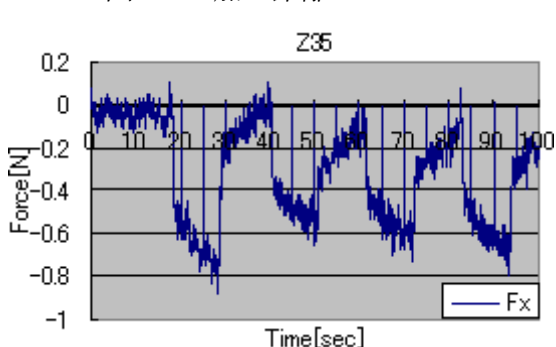


図 3.95 加工距離 17.5m

Force[Y]方向

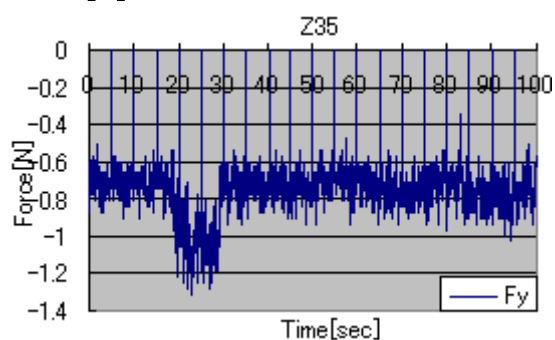


図 3.96 加工距離 2.5m

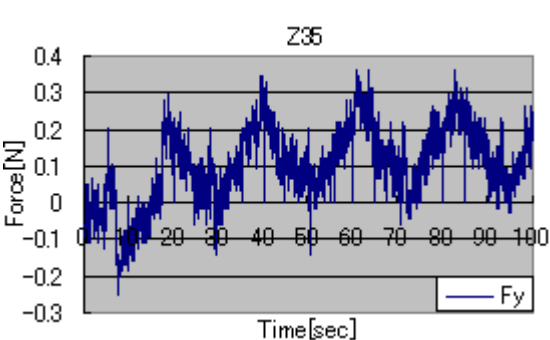


図 3.97 加工距離 5m

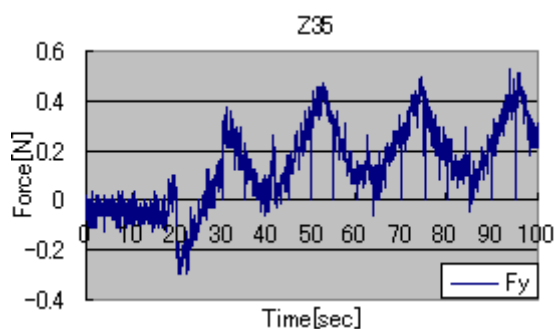


図 3.98 加工距離 10m

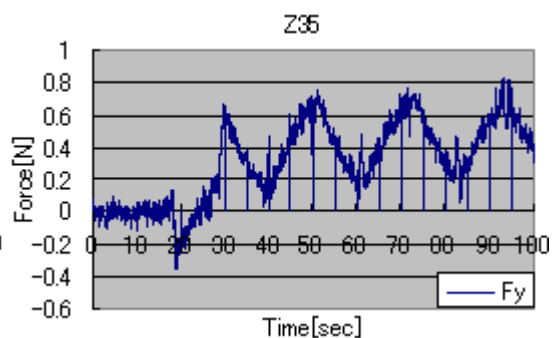


図 3.99 加工距離 17.5m

Force[Z]方向の力

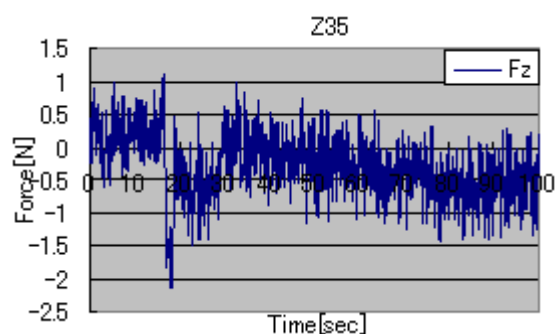


図 3.100 加工距離 2.5m

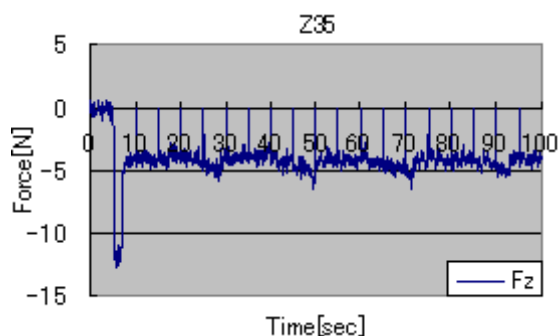


図 3.101 加工距離 5m

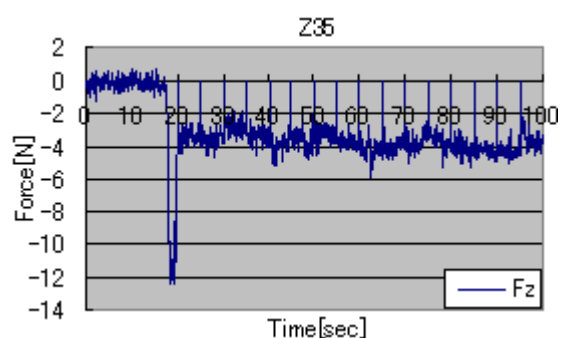


図 3.102 加工距離 10m

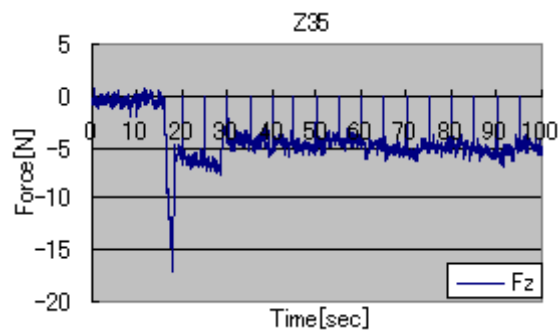


図 3.103 加工距離 17.5m

Torque[X]方向の力

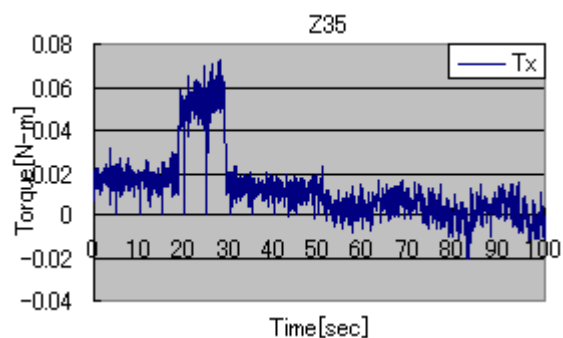


図 3.104 加工距離 2.5m

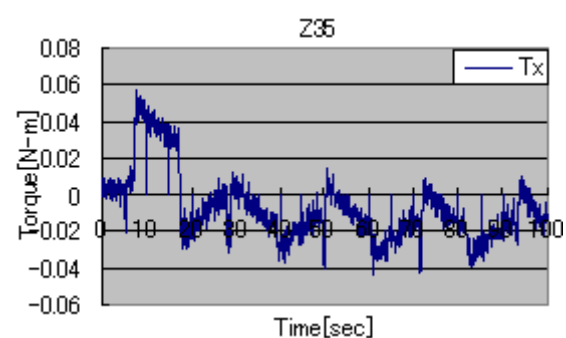


図 3.105 加工距離 5m

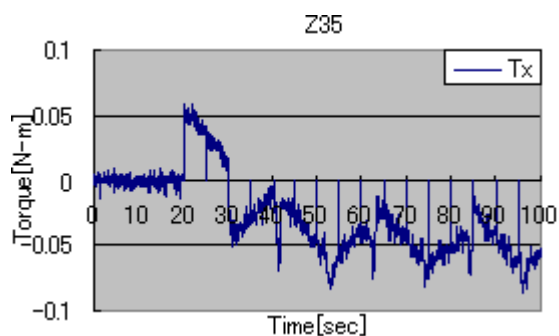


図 3.106 加工距離 10m

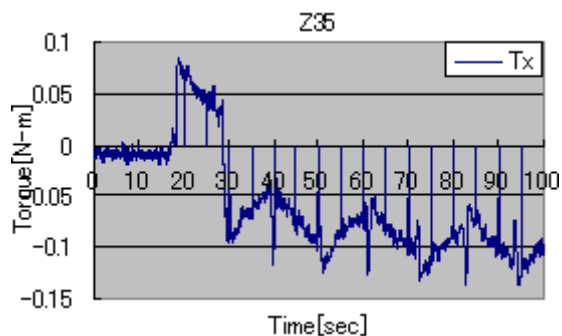


図 3.107 加工距離 17.5m

Torque[Y]方向の力

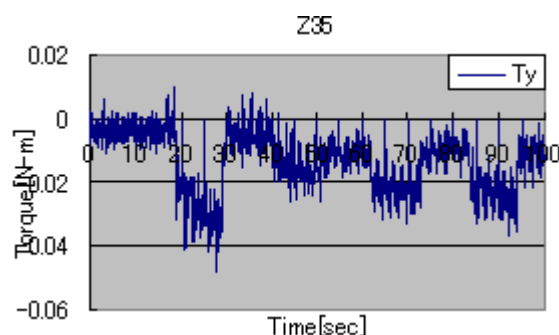


図 3.108 加工距離 2.5m

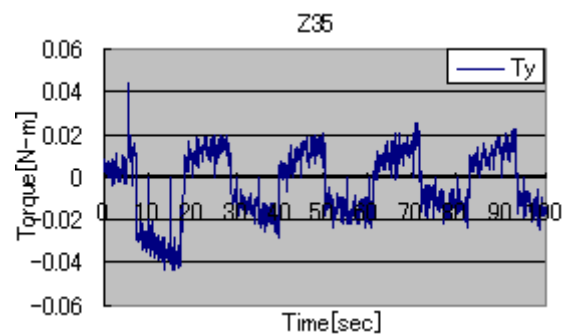


図 3.109 加工距離 5m

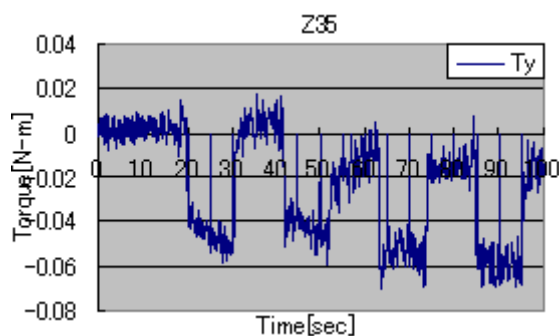


図 3.110 加工距離 10m

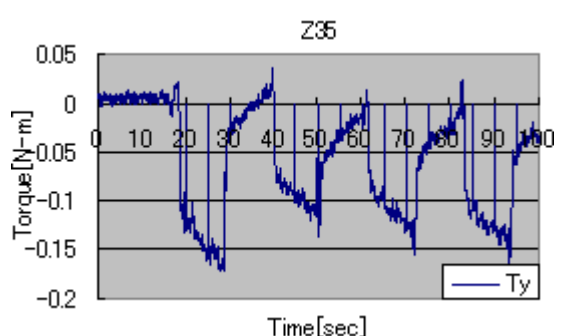


図 3.111 加工距離 17.5m

Torque[Z]方向の力

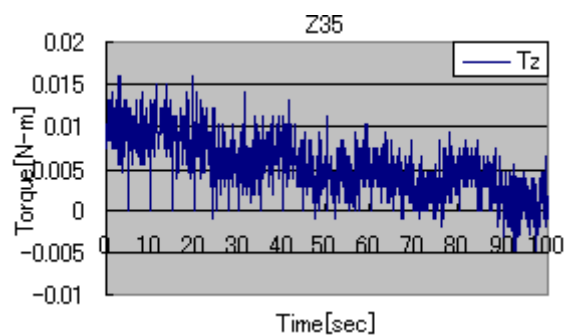


図 3.112 加工距離 2.5m

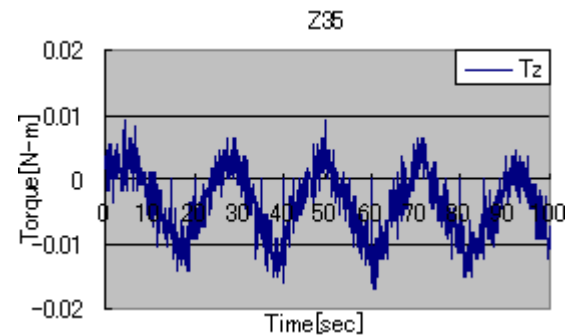


図 3.113 加工距離 5m

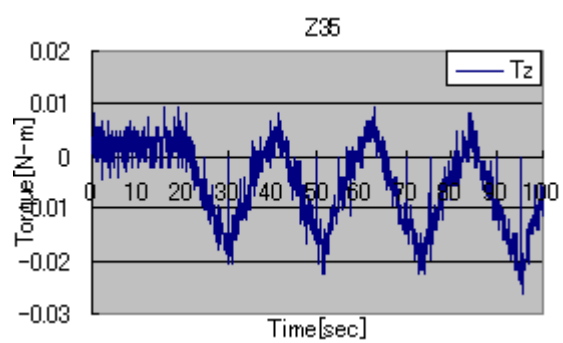


図 3.114 加工距離 10m

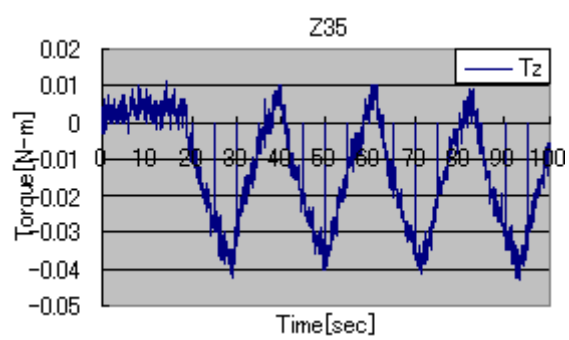


図 3.115 加工距離 17.5m

4.1 切込み量 35 μm 加工における実験結果

下の図 3.116 は図 3.92～図 3.103 の Force[Fx,Fy,Fz]の往復加工時の平均値を加工距離ごとにグラフ化したものである。図 3.116 の Force[Fx,Fy]グラフより、加工距離が変化すれば当然ボールエンドミルの磨耗が進むため Force も増加傾向になると判断しがちである。しかし今回 Fx,Fy 共に 1[N]以下で加工が出来ていることが分かる。また Fz の Force は最大値が 5[N]と力がかかっているように思われがちであるが、放電加工機は Z 方向の力は非常に強いいためこの値はあまり大きな値ではないことが分かる。以上の点より SK-5 焼入れ鋼(HRC55)に切込み量 35 μm 加工は加工可能であることが分かる。

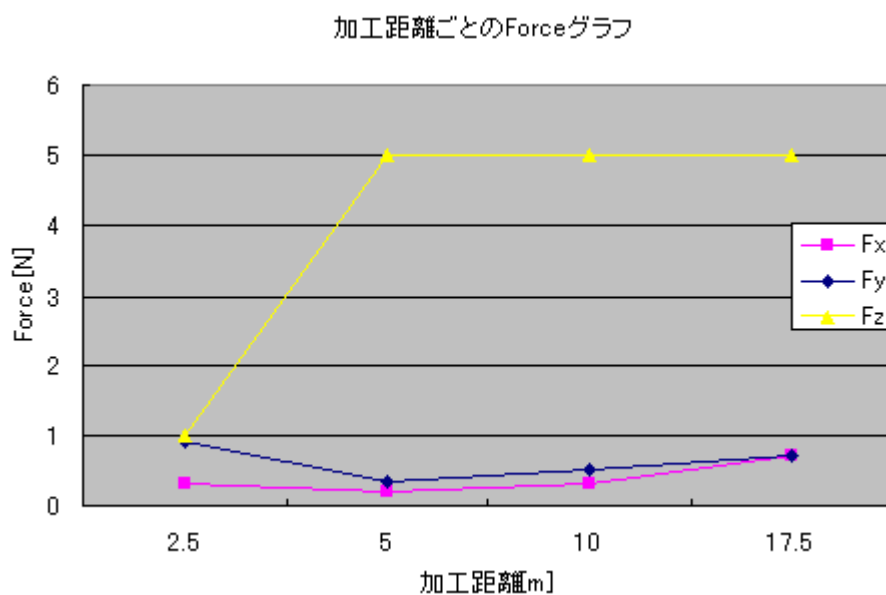


図 3.116 加工距離と Force の関係

図 3-117 は図 3-104～図 3-115 の Torque[Tx,Ty,Tz]の往復加工時の平均値をそれぞれグラフ化したものである。Torque グラフを見ても分かるように Tx の最大値が 0.06[N-m],Ty の最大値 0.13[N-m],Tz の最大値 0.04[N-m]とさほど大きな力がかかっていないことから切込み量 35 μ m加工時の Torque の値は無視できる値にあることが分かる。

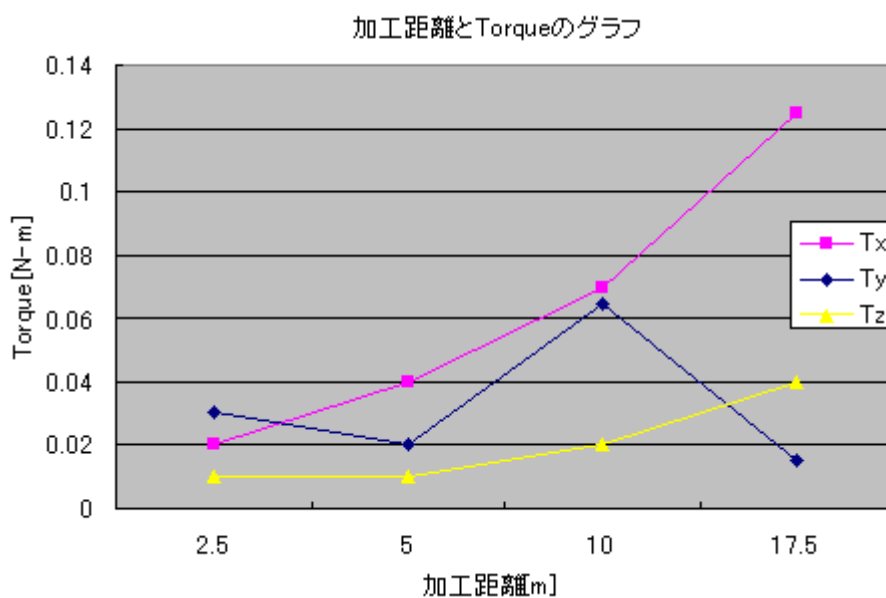


図 3.117 加工距離ごとの Torque グラフ

3.5.4 放電荒加工面 $15[\mu\text{m}/\text{Ry}]$ に切込み量 $35\mu\text{m}$ 加工

図 3.87 の 2.5m 加工後のワークの表面を見れば分かるがビブりが発生している。このビブり現象は肉厚が薄い加工物に発生したり長尺エンドミルで加工を行う場合このような現象が発生すると考えられる。そのため切込み量一定(Z) $35\mu\text{m}$ で表 3.1 実験条件により図 3.3 の高速スピンドルのチャック部分からエンドミルの先端までの距離を $30\text{mm}\sim 20\text{mm}$ へと変化させて加工を行えばビブりが解消できるのではないかと考え今回実験を行なった。

(1) 顕微鏡写真による刃の磨耗結果

今回 2.5m で加工を終了したが、2.5m の場合、エンドミルの先端部分が少し磨耗していることが分かる。加工深さ(Z)を $35\mu\text{m}$ ととっているためこの後、エンドミルの磨耗は図 3.83～図 3.85 のように磨耗していく。

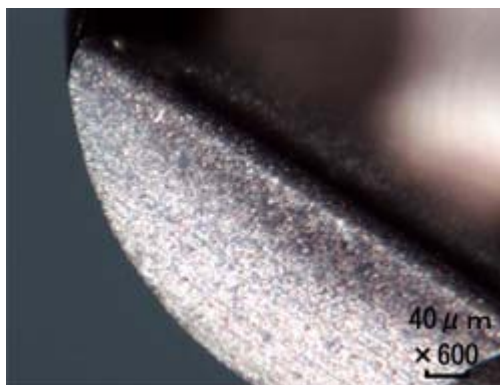


図 3.118 新品のエンドミル

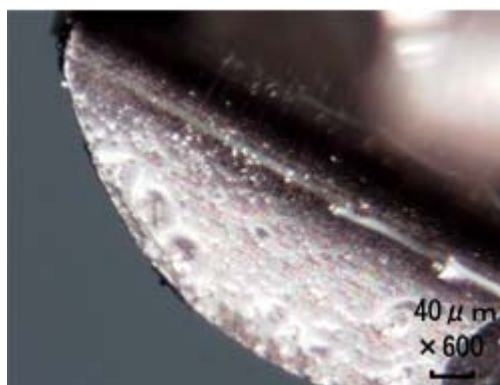


図 3.119 加工距離 2.5m

(2)顕微鏡写真によるワークの実験結果

スピンドルのチャック部分からボールエンドミルの先端部分までの距離を 30mm から 20mm と変化させ加工を行ったがその結果、加工距離 2.5m の場合、ワークの表面にビバリ現象が発生しなくなった。この結果より図 3.87 の加工距離 2.5m のワークの表面のビバリはボールエンドミルのストロークが長かったためビバリが発生していたことが判明した。

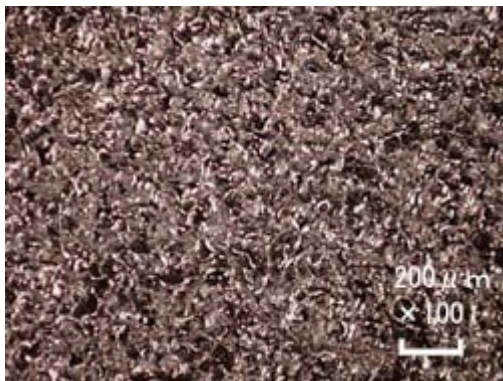


図 3.120 放電荒加工面 15 $\mu\text{m}/\text{Ry}$

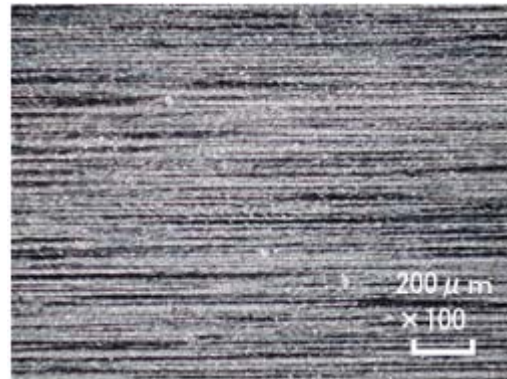


図 3.121 加工距離 2.5m

(3) センサによる Force/Torque の測定結果

次に、Force/Torque のグラフを図 3.122～図 3.127 に示した。Force/Torque の測定は、非接触で 40000rpm 状態で加工を開始し、約 40 秒後に測定を開始した。

Force/Torque の測定結果は、図 3.92～図 3.115 と同じ結果になった。

Force

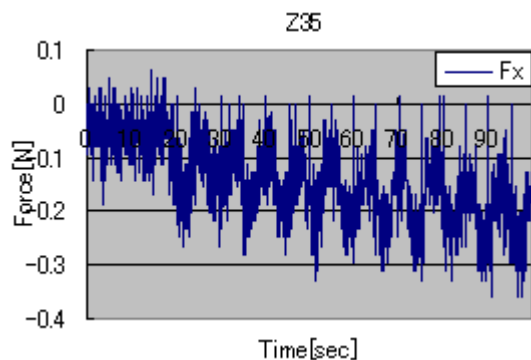


図 3.122 Force[Fx]

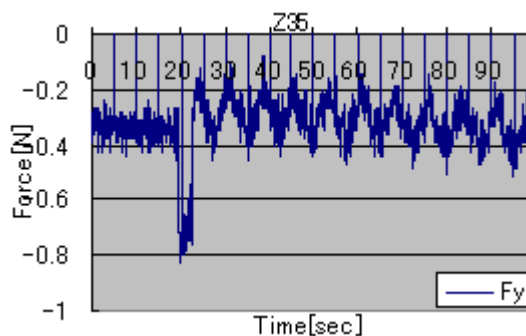


図 3.123 Force[Fy]

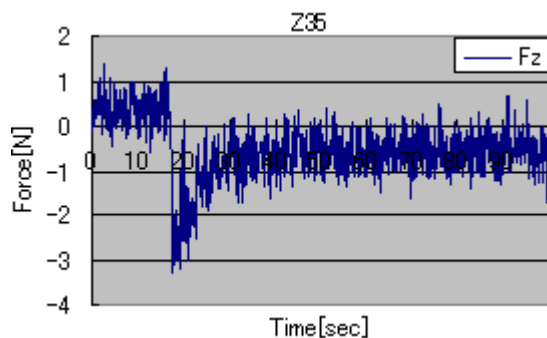


図 3.124 Force[Fz]

Torque

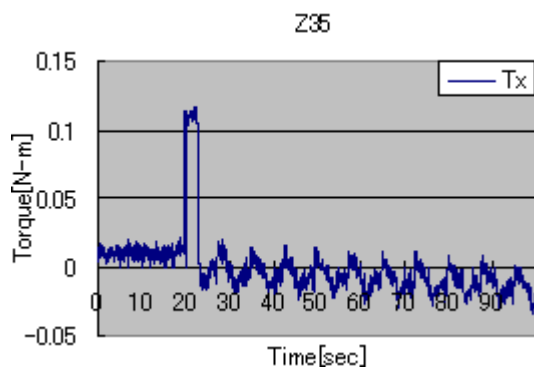


図 3.125 Torque[Tx]

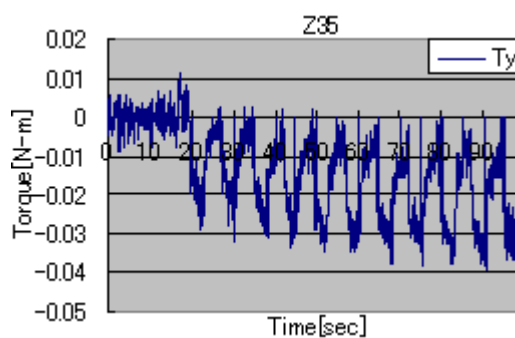


図 3.126 Torque[Ty]

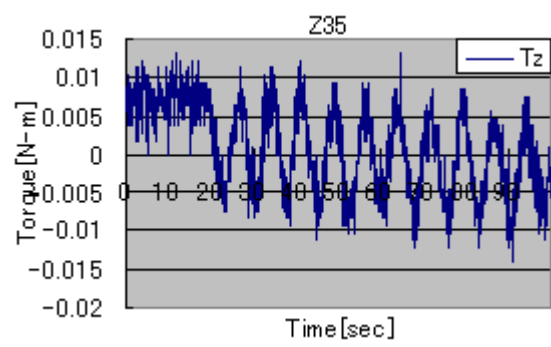


図 3.127 Torque[Tz]

従来の加工法と複合加工との時間比較

放電加工で $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ まで加工したものが図 3.128 である。図 3.129 は放電荒加工 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ 加工後、複合加工により仕上げ加工をおこなった表面写真。図 3.130 は放電加工のみで荒加工から仕上げ加工 $1\text{ }\mu\text{m}$ まで加工を行った表面写真。

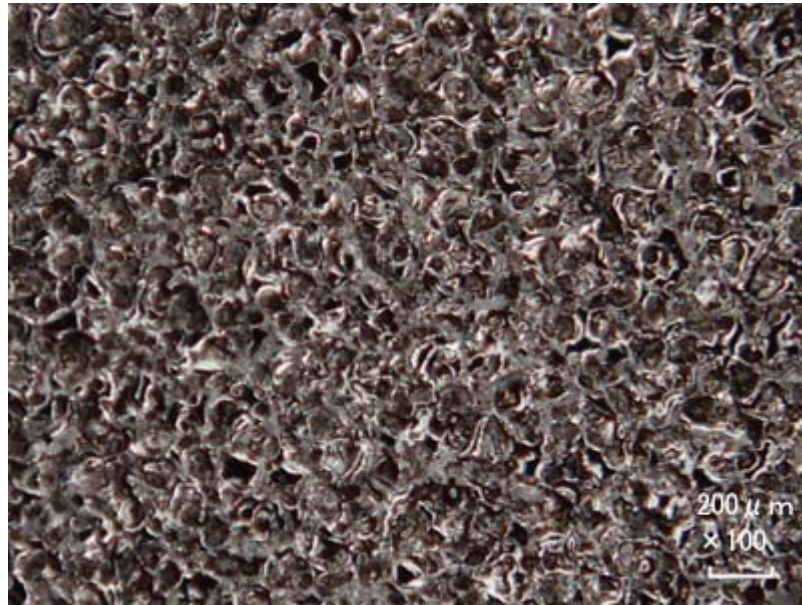


図 3.128 放電荒加工面 $15\text{ }\mu\text{m/Ry}$ の表面写真



図 3.129 放電荒加工後複合加工を行った表面写真



図 3.130 放電加工のみで仕上げ加工 $1\mu\text{m}$ まで行なった表面写真

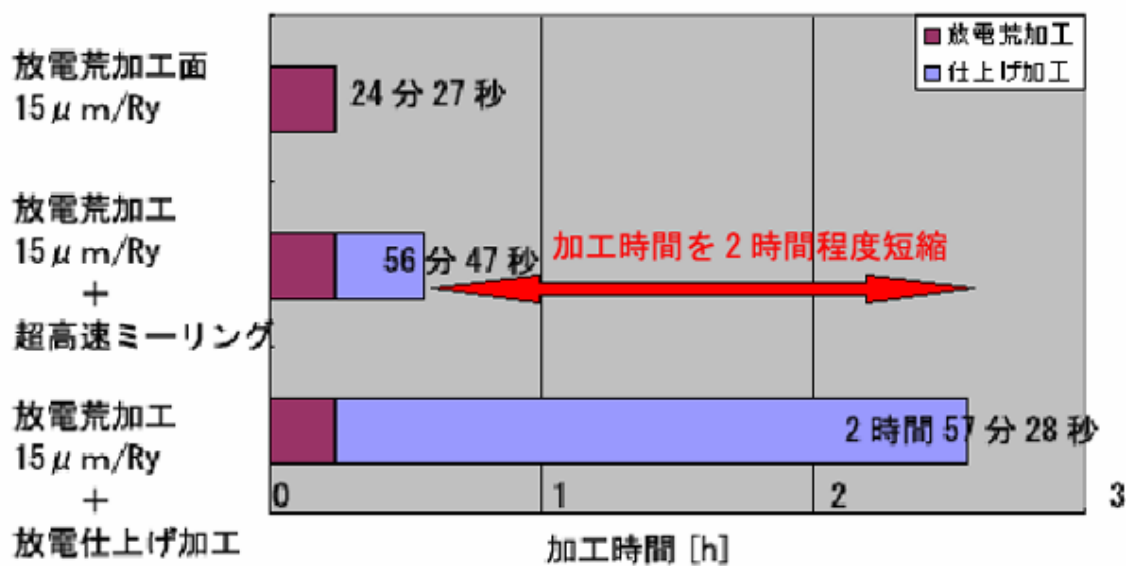


図 3.131 加工時間の比較グラフ

実験結果

縦 5mm × 横 5mm の正方形を加工する場合、図 3.131 のグラフを見ても分かるように、放電加工のみで仕上げ加工 $1\mu\text{m}$ まで加工を行う場合、2 時間 57 分 28 秒と時間がかかるのに対し荒加工により $15\mu\text{m}$ まで放電加工をおこない中加工 ($15\mu\text{m/Ry}$) から仕上げ加工 $1\mu\text{m}$ まで加工をおこなった場合 56 分 47 秒とおよそ 2 時間程度の時間短縮ができる結果となり、比率では 68% 削減できることが判明した。

(4)加工段階ごとのワーク硬度測定結果

焼入れ鋼のワーク、放電荒加工後、ミーリング加工後の表面硬さの測定を行なった。

X 軸（切込み量）はミーリング加工時の(Z)を 15,25,35[μm]と変化させながら加工を行なった場合である。

測定回数は加工段階ごとのワークの表面を 5 回測定し、その平均を取りグラフ化した。図 3.128 のグラフより、SK-5 の焼入れ鋼 HRC55 の硬さは 600Hv 前後で放電加工後少し表面が硬くなり 750~690Hv の間で変化している。ミーリング加工後は放電加工後より少し表面が柔らかくなり 730~710Hv 前後になっていることが下のグラフより判断できる。

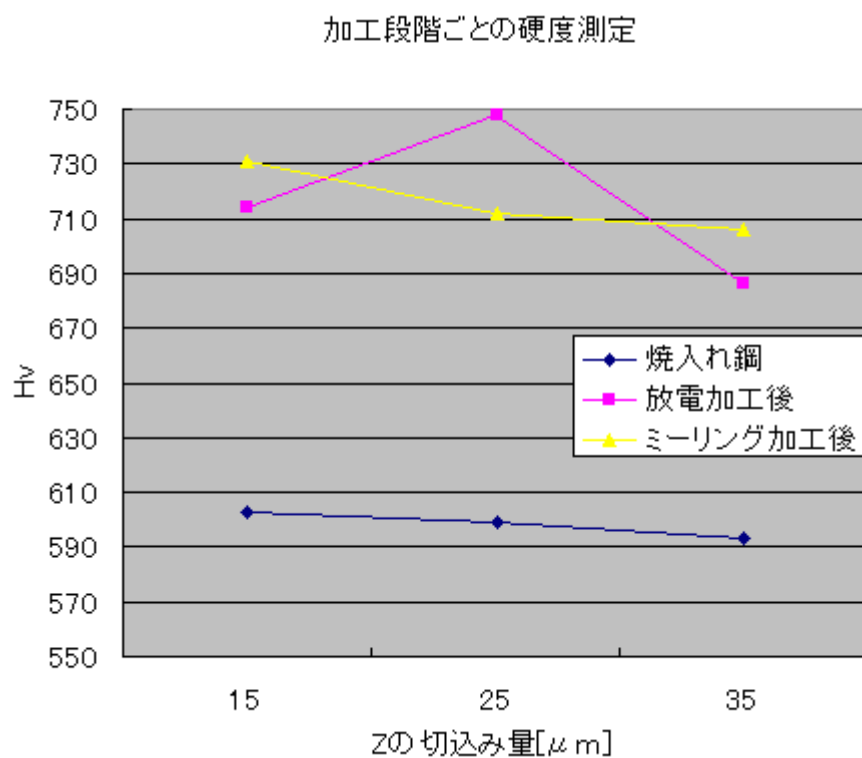


図 3.128 加工段階ごとの硬度測定

3.6 まとめ

本研究は、形彫放電加工機において荒加工段階で超高速ミーリング加工に同一機械上で切り替え加工を行うことで、加工精度及び形彫放電加工機での超高速ミーリングの適応性について検討したものである。今までのミーリング加工と違うため、放電荒加工面に対する超高速ミーリング加工後の表面精度及び工具の寿命を明らかにする研究である。

まず、切込み量とボールエンドミルの磨耗の実験結果であるが、切込み量 15、25[μm]の場合、直線距離で 30m 加工可能であり、切込み量 35[μm]では直線距離で 17.5m 加工すればエンドミルが磨耗し切れなくなることが分かった。次に高速ミーリング加工後のワークの表面荒さであるが、切込み量(Z)に関係なく平行方向では 1 μm 以内、垂直方向でも 2 μm 以内の表面粗さが得られていることから、放電荒加工面 15 $\mu\text{m}/R_y$ に切込み量(Z)15 μm 以上であれば非常に良い面が得られることが判明した。

ワークの顕微鏡写真より、加工距離 2.5m 加工後のワークは切込み量に関係なく少し表面が荒く加工されており、加工距離が少し進むと非常に良い面に仕上がられていることが分かった。また、切込み量を深くするとボールエンドミルが切削力の影響を受けやすくなり、図 3.87 のようにワークの表面にビビリ現象が発生する。そのため、切込み量を深くするにつれて、図 3.2 図 3.3 のようにエンドミルとチャック部分の距離を短くすればビビリが発生しなくなることも分かった。

従来の加工法と複合加工を比較すると、縦 5mm×横 5mm の平面ではおよそ 2 時間程度の時間短縮できることが今回の実験より明らかとなった。

4.焼入れ鋼に直接高速ミーリング加工を行う実験について

4.1 実験概要

本実験では、SK-5 の焼入れ鋼(HRC55)に超高速回転ミーリング加工を行い、ボールエンドミルの磨耗についての実験を行なう。切込み量(Z)15 μm 加工の場合、どの程度加工すればエンドミルの磨耗が進むかについて実験を行ない、加工距離ごとの表面粗さ及び軸にかかる Force/Torque の測定をおこなう。

4.2 実験方法

表 4.1 で示すように(Z)の値を 15[μm]と一定の切込み量で、縦 5mm×横 5mm の正方形を図 2.1 に示すように走査線状に超高速ミーリングをおこなう。本実験は、表 4.1 に示す加工条件により加工を行った。

表 4.1 加工条件

被加工物	SK5(HRC55)
電極材料	CU
送り[mm/min]	100
主軸回転数[rpm]	40000
ピック量Y[μm]	10
ボールエンドミル直径[mm]	0.8
加工液面高さ[mm]	20
切り込み量Z[μm]	15

4.3 実験結果

(1)顕微鏡写真による刃の磨耗結果

SK-5焼入れ鋼(HRC55)に切り込み量 $15\mu\text{m}$ 加工後の場合,ボールエンドミル先端の写真を以下に示す。図 4.1 新品エンドミルと図 4.3 加工距離 10m のボールエンドミル先端部分を比較しても分かるように 10m 加工後のボールエンドミルでは、先端部分の R が少し磨耗していることが写真より分かる。さらに、図 4.4 加工距離 20m 図 4.5 加工距離 30m と加工距離が進むにつれて磨耗が激しくなり加工距離 30m では、ボールエンドミルの先端部分の R がかなり磨耗し先端部分に凹凸がはっきり分かる程度に磨耗が進んでいることがデジタル顕微鏡写真からも分かる。また加工時に耳で聞いて分かる程度に音が発生するようになり、超高速ミーリング加工機にも相当の熱をもつようになったため切り込み量 $15\mu\text{m}$ の加工では直線距離で 30m 加工すればエンドミルが磨耗し加工できなくなることが顕微鏡写真より分かる。

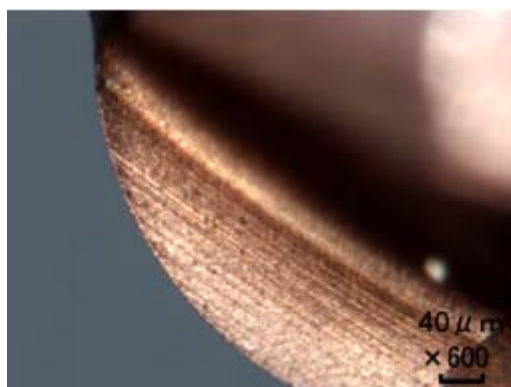


図 4.1 新品のエンドミル

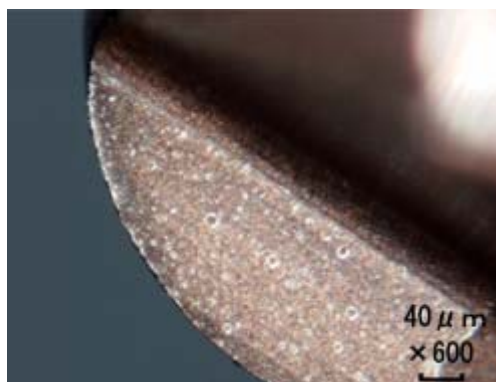


図 4.2 加工距離 2.5m

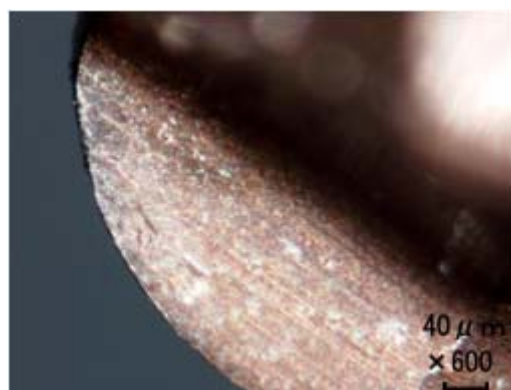


図 4.3 加工距離 10m

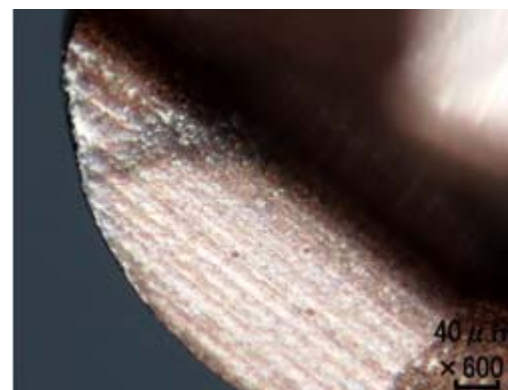


図 4.4 加工距離 20m

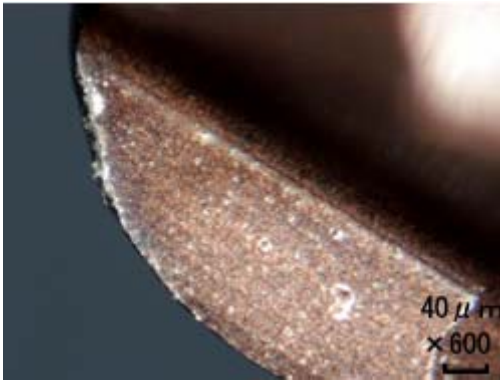


图 4.5 加工距離 30m

(1) 顕微鏡写真によるワークの実験結果

SK-5 焼入れ鋼(HRC55)における超高速ミーリング加工後のデジタル顕微鏡写真を以下に示す。まず超高速ミーリング加工前の焼入れ鋼の表面顕微鏡写真を図4.6に示し、切り込み量一定(Z)15[μm]、加工距離 2.5,10,20,30[m]加工ごとの顕微鏡写真を図 4.7～図 4.10 に示す。図 4.7 を見てみると、表面に少し凹凸があり少し面が粗く加工されていることが分かる。図 4.8、図 4.9 と加工距離が伸びていくにつれ表面の凹凸が少なくなっていることが顕微鏡写真より判断できる。しかし、ある一定の距離加工をするとエンドミルの磨耗により図 4.10 のように表面に少し凹凸が目立つようになってくる。顕微鏡写真で判断すると切り込み量 15[μm]の加工の場合、加工距離 10m が表面の凹凸が最小であると判断できる。



図 4.6 焼入れ鋼の表面写真

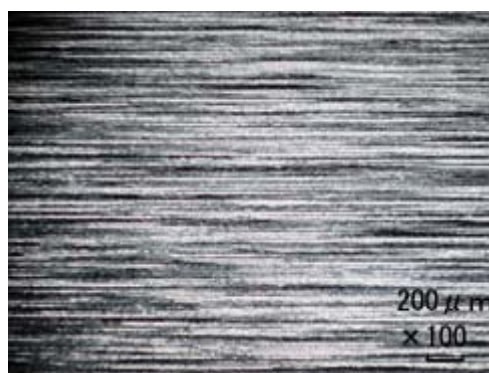


図 4.7 加工距離 2.5m 加工後の表面写真

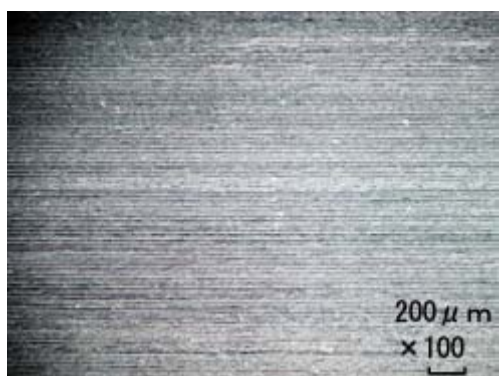


図 4.8 加工距離 10m 加工後の表面写真

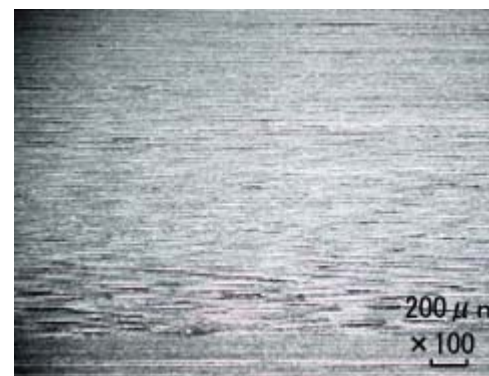


図 4.9 加工距離 20m 加工後の表面写真

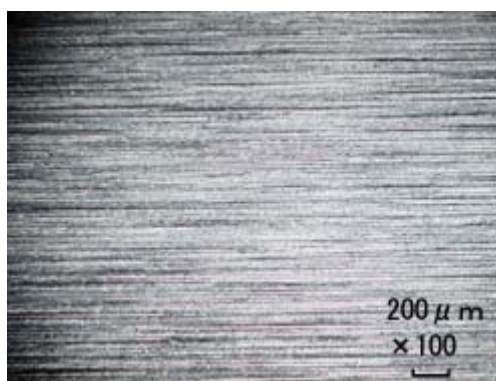


図 4.10 加工距離 30m 加工後の表面写真

(3) ミーリング加工後における表面粗さの実験結果

SK-5 の焼入れ鋼(HRC55)に切込み量(Z)15 μm 高速ミーリング加工後の表面粗さは、平行方向での最大値が 1.1 μm ～最小値 0.6 μm の間で表面粗さが変化していることが下のグラフより判断できる。また垂直方向は最大値 2.4 μm ～最小値 1.6 μm の間で変化していることが下のグラフより判断できる。ワークの表面粗さの実験結果より平行方向は 1.1 μm 以内、垂直方向でも 2.4 μm とどちらの方向の表面粗さも良い面に仕上がっていることが分かる。

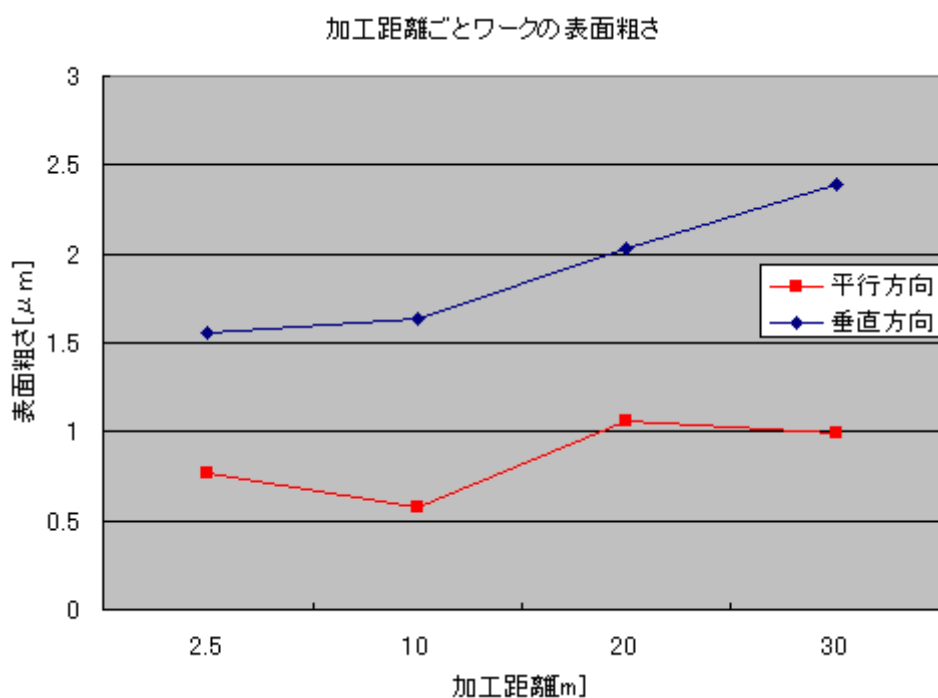


図 4.11 加工距離とワークの表面粗さの関係

(4) センサによる Force/Torque の測定結果

次に、Force/Torque のグラフを図 4.12～図 4.23 に示した。Force/Torque の測定は、非接触で 40000rpm 状態で加工を開始し、約 40 秒後に測定を開始した。

Force[X]

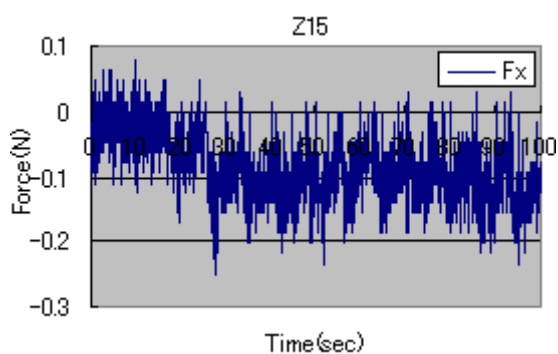


図 4.12 加工距離 2.5m

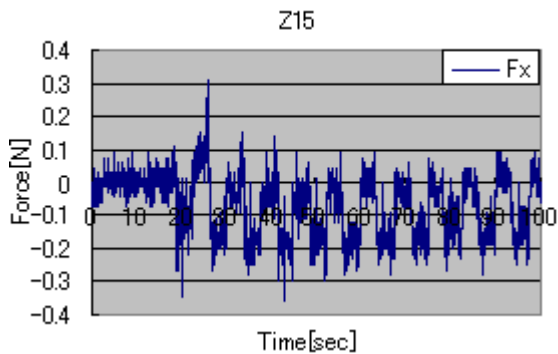


図 4.13 加工距離 10m

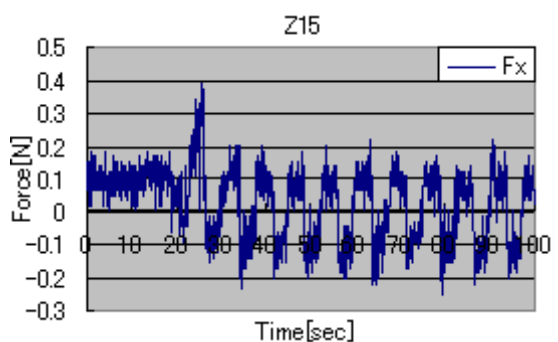


図 4.14 加工距離 20m

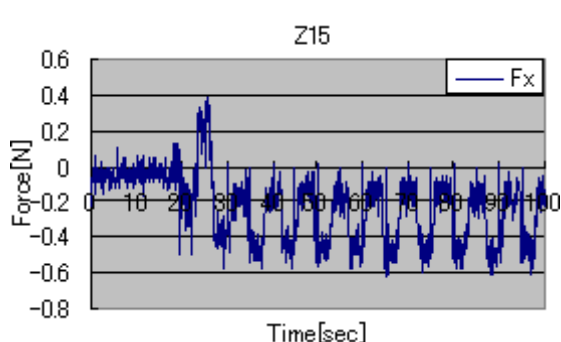


図 4.15 加工距離 30m

Force[Y]

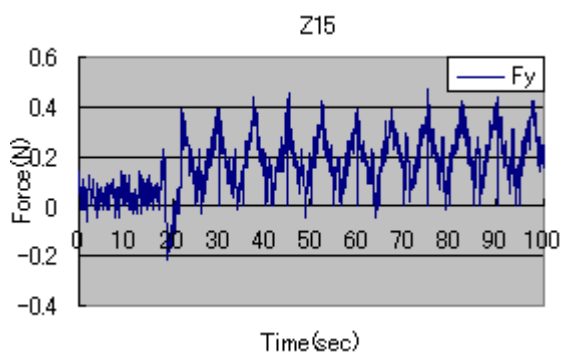


図 4.16 加工距離 2.5m

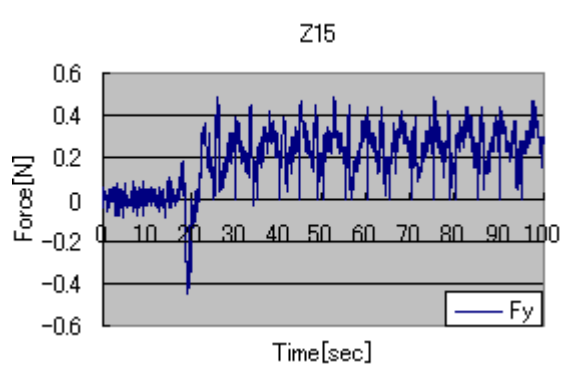


図 4.17 加工距離 10m

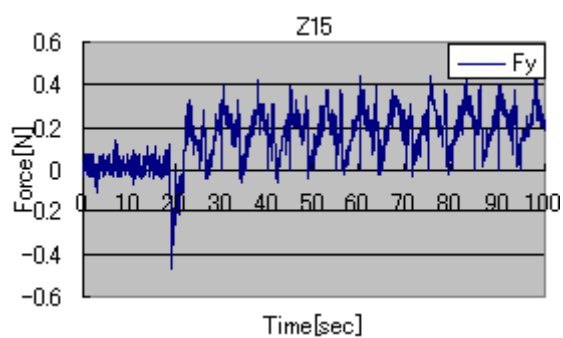


図 4.18 加工距離 20m

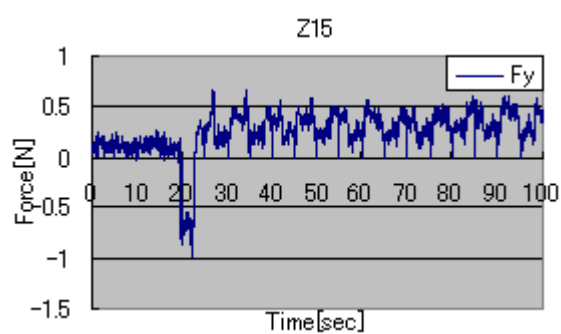


図 4.19 加工距離 30m

Force[Z]

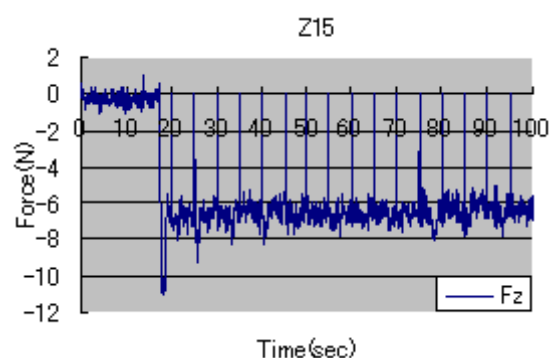


図 4.20 加工距離 2.5m

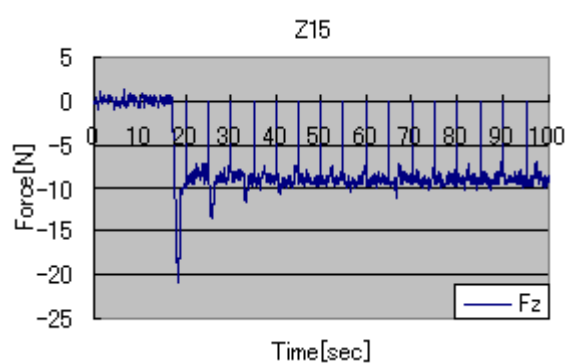


図 4.21 加工距離 10m

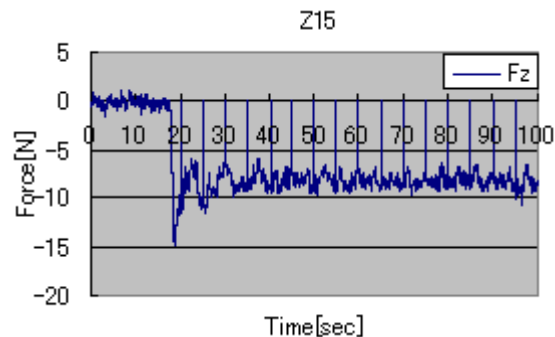


図 4.22 加工距離 20m

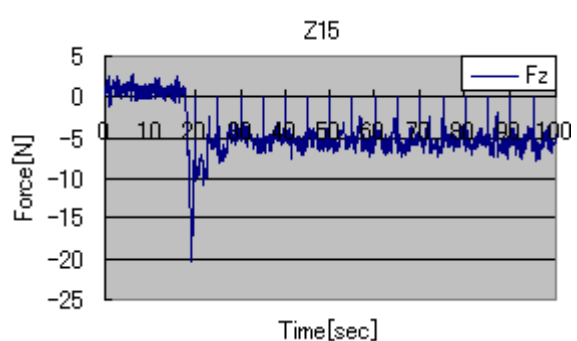


図 4.23 加工距離 30m

Torque[X]

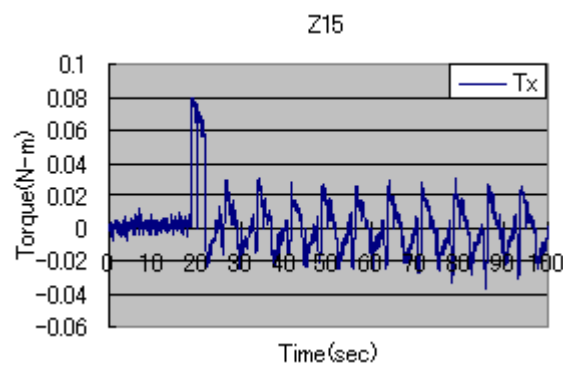


図 4.24 加工距離 2.5m

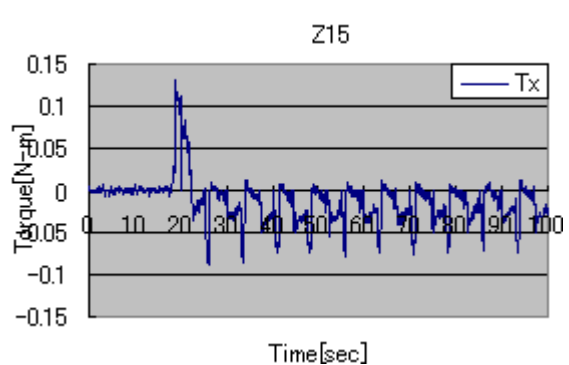


図 4.25 加工距離 10m

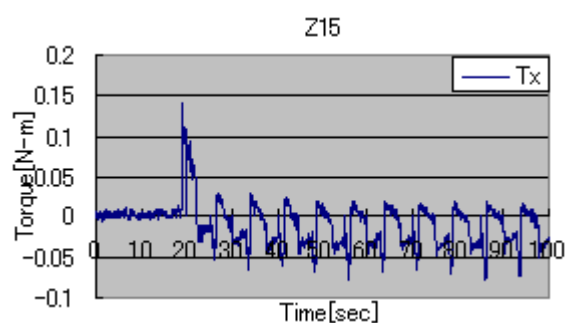


図 4.26 加工距離 20m

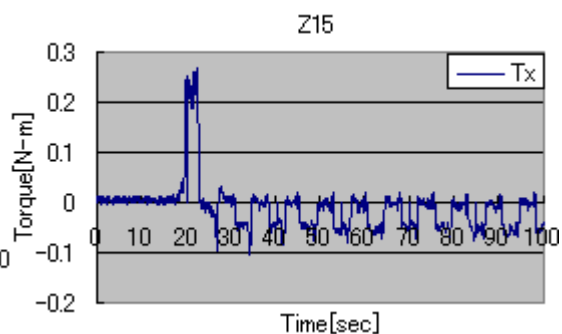


図 4.27 加工距離 30m

Torque[Y]

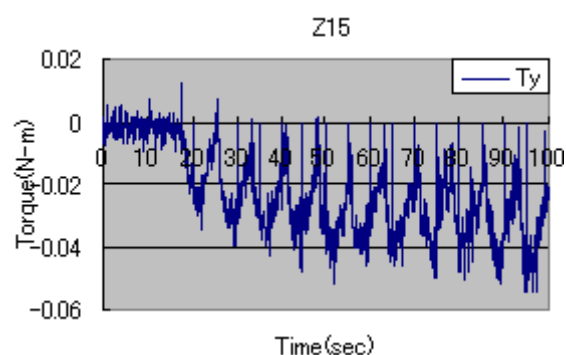


図 4.28 加工距離 2.5m

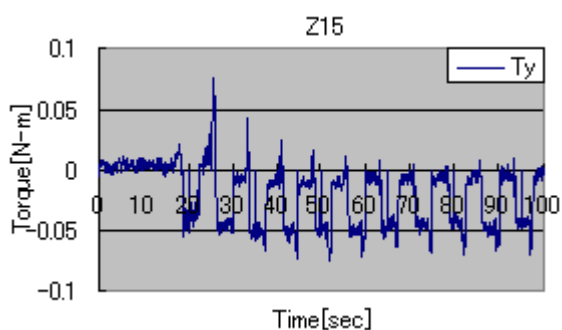


図 4.29 加工距離 10m

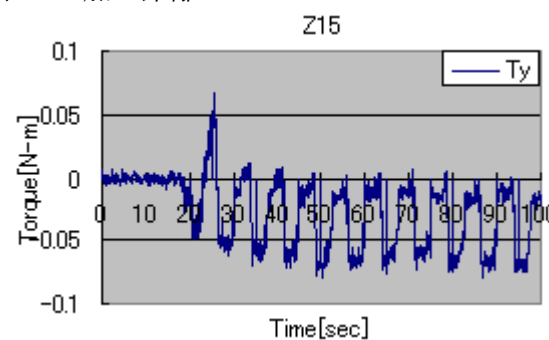


図 4.30 加工距離 20m

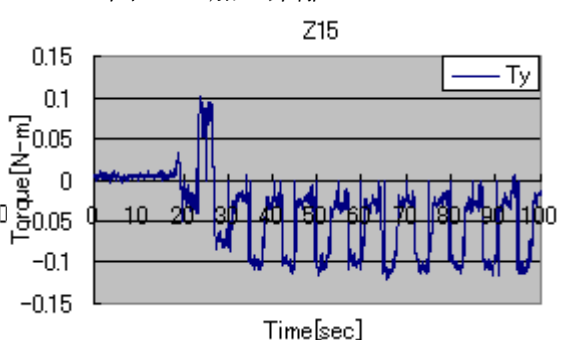


図 4.31 加工距離 30m

Torque[Z]

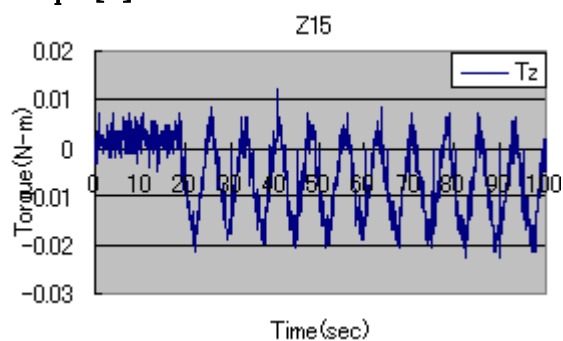


図 4.32 加工距離 2.5m

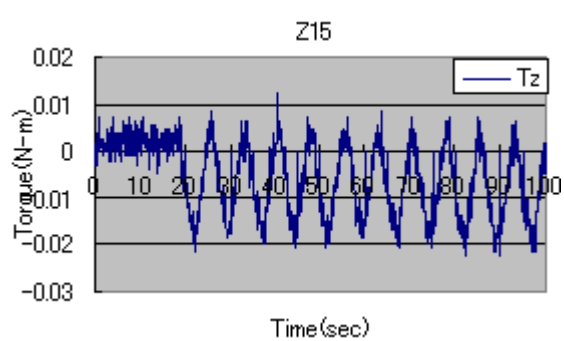


図 4.33 加工距離 10m

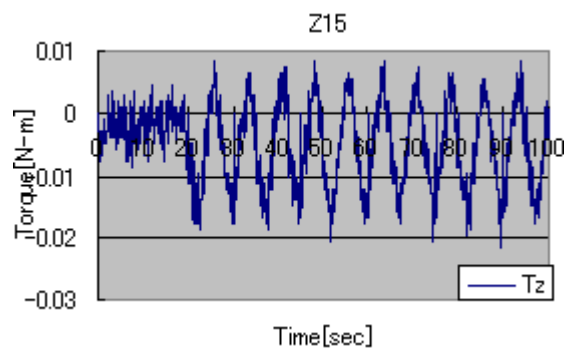


图 4.34 加工距離 20m

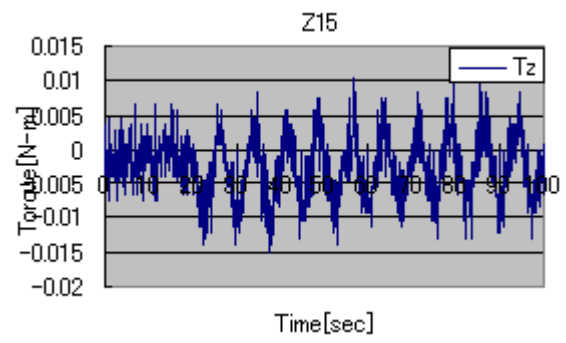


图 4.35 加工距離 30m

4.1 切込み量 15 μm 加工における実験結果

下の図 4.36 は図 4.12～図 4.23 の Force[Fx,Fy,Fz]の往復加工時の平均値を加工距離ごとにグラフ化したものである。図 4.36 の Force グラフより、加工距離が変化すれば当然ボールエンドミルの磨耗が進むため Force[Fx,Fy]も増加傾向になると判断しがちである。しかし今回 Fx,Fy 共に 1[N]以下で加工出来ていることが分かる。また Fz の最大値が 10[N]と力がかかっているように思われがちであるが、放電加工機は Z 方向の力は非常に強いので、この値はあまり大きな値ではないことが分かる。以上の点より SK-5 焼入れ鋼(HRC55)に直接ミーリング加工（切込み量 15 μm ）が加工可能であることが分かる。

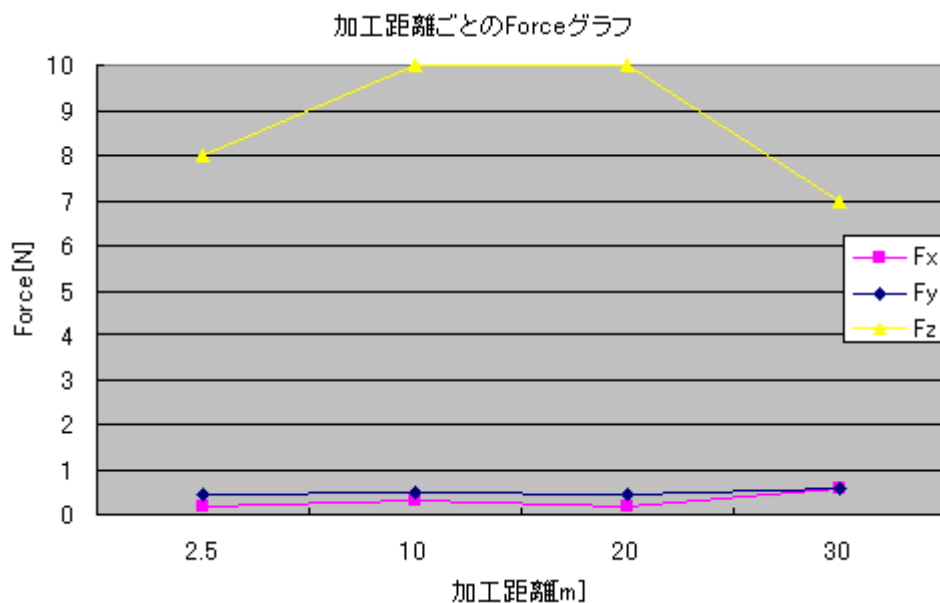


図 4.36 加工距離ごとの Force グラフ

図 4.37 は図 4.24～図 4.35 の Torque[Tx,Ty,Tz]の往復加工時の平均値をそれぞれグラフ化したものである。Torque グラフを見ても分かるが、Tx の最大値が 0.09[N-m],Ty の最大値 0.12[N-m],Tz の最大値 0.02[N-m]とさほど大きな力がかかっていないことから切込み量 15 μ m加工時の Torque の値は放電加工機からみると非常に小さな値であるため無視できる値にあることが分かる。

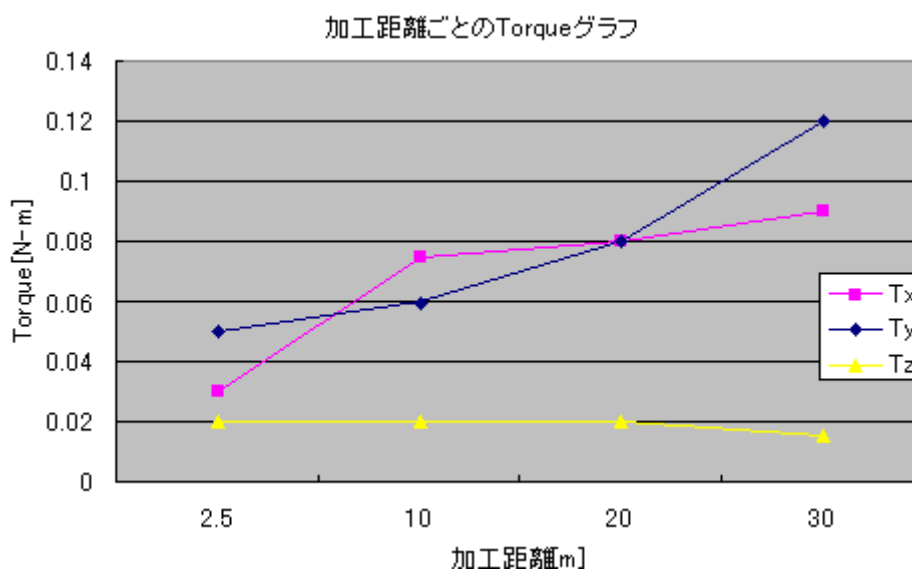


図 4.37 加工距離ごとの Torque グラフ

4.4 まとめ

以上の実験結果より、SK-5 の焼入れ鋼(HRC55)に切込み量一定(Z)15 μm 超高速ミリング加工を行った場合、ボールエンドミルの磨耗は直線距離で 30m 加工すればボールエンドミルが磨耗し切れなくなることが判明した。また、顕微鏡写真よりワークの表面写真を見た場合、加工距離 10m のワークの表面が綺麗に加工出来ており、その後加工距離が伸びるにつれて表面が荒くなるという傾向にあることが顕微鏡写真より判断できる。加工後のワークの表面荒さから判断すると 2.5m 加工の場合と 30m 加工後の表面粗さを比較しても分かるが 2.5m 加工後の平行方向では 0.77 μm 垂直方向で 1.56 μm の表面荒さに対して 30m 加工後では平行方向で 1 μm 垂直方向で 2.4 μm と加工距離が伸びるにつれて表面が荒くなっているという結果になる。Force/Torque グラフより Force[Fx,Fy]の力は最大でも 1[N]以下、Torque[Tx,Ty,Tz]の最大トルクは 0.12[N-m]と放電加工機から見ると非常に小さな力で加工できていることがわかる。

5 結論

- 1) 従来の加工法と複合加工を比較すると、縦 5mm×横 mm の平面では複合加工の方が 2 時間程度の時間短縮ができることが明らかとなった。
- 2) 放電加工後に複合加工することにより、切込み量(Z)に関係なく平行方向で 1 μ m 以内、垂直方向でも 2 μ m 以内の面荒さが加工可能である。
- 3) 6 軸 Force/Torque センサより、切込み量(Z)を変化させても Force[Fx,Fy]方向の力は最大でも 1[N]以下、Torque[Tx,Ty,Tz]でも 0.2[N-m]以下と放電加工機から判断すると非常に小さな力で加工ができることが分かる。
- 4) ボールエンドミルの磨耗は切込み量 15,25[μ m]加工の場合直線距離で 30m、切込み深さ 35[μ m]では直線距離で 17.5m 加工すればエンドミルが磨耗し切れなくなることが判明した。
- 5) 今回の実験で、複合加工と高速ミーリング加工のみでの加工とを比較した。その結果、平面ではどちらも同じような結果が得られた。
- 6) (5)の結果より、加工形状を 3 次元形状へと変化させ加工を行なった場合には複合加工の方が実用的であることが分かる。

謝辞

本研究及び本論文は、小林和彦のご指導の元に行われ、完成するに至りました。終始ご指導いただいた同教授に厚く御礼申し上げます。

同研究室、修士 2 年の白倉友也氏には研究を進めるにあたり、多くのご指導、ご協力を頂くと共に、研究外の事柄に対しても非常にお世話になり、同氏に深く感謝の意を示すものであります。

また長尾研究室の方々には、本研究の完成に際し、ご援助及びご協力を頂いた事に関して感謝し、御礼申し上げます。

参考文献・資料

- 1) 牧口利貞 萬戸博宗 武田徹 有田正司 鈴木鎮夫 中田栄一 氏原昭
複合加工技術 P.1.2
- 2) 松岡甫篁 安斎正博 高橋一郎 はじめての切削加工
P.144～157
- 3) ツールエンジニア編集者 エンドミルのすべて
P.86.87.92～95
- 4) 岡村健二郎 切削工学
P3.4 P174～P176
- 5) 竹山秀彦 切削加工
P104～P108
- 6) 武藤一夫 高松英次 金型設計・加工技術
P152～P156
- 7) 三菱 NC 形彫放電加工機 VX シリーズ 取扱説明書
- 8) 型技術、特集 高速切削の効果を上げる工具選定、超高速ミーリング HICART に
よる加工法と加工特性、RIKEN、高橋一郎、安藤正博 F-MILL による高速切削加
工と仕上レス、富士テクニカ、渡辺克則
- 9) 株式会社ナカニシ HES-BT40S 取扱説明書
- 10) ビー・エル・オートテック株式会社 Delta330/30ISA-bus システム仕様書
- 11) オムロン株式会社 3D デジタルファインスコープ 形 VC3000 取扱説明書